

В. Т. РЕННЕ

**ПЛЕНОЧНЫЕ
КОНДЕНСАТОРЫ
С ОРГАНИЧЕСКИМ
ДИЭЛЕКТРИКОМ**

В. Т. РЕННЕ

ПЛЕНОЧНЫЕ
КОНДЕНСАТОРЫ
С ОРГАНИЧЕСКИМ
СИНТЕТИЧЕСКИМ
ДИЭЛЕКТРИКОМ

Издание второе,
переработанное и дополненное



«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1971

Ренне В. Т.

Р39 Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. «Энергия», Л., 1971.

240 с. с илл.

В книге излагаются сведения о свойствах, конструкции и технологии электрических конденсаторов постоянной емкости нового типа с органическим синтетическим пленочным диэлектриком. Приводятся также данные о синтетических пленках, применяемых для производства конденсаторов этого типа.

Книга рассчитана на инженеров-электриков и радиотехников, имеющих дело с изготовлением и применением конденсаторов, она может быть полезна также студентам старших курсов вузов.

33-3-10

155-71

6П2.1.06

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Первое издание этой книги, вышедшее в 1963 г., быстро разошлось и получило благоприятные отзывы как в СССР, так и за рубежом. За истекшие годы с момента выхода первого издания применение синтетических органических пленок в современном конденсаторостроении продолжало быстро расширяться, что привело к необходимости существенно обновить содержание книги по сравнению с первым изданием и немного его расширить. Часть устаревших данных в новом издании исключена.

Кроме тех четырех глав, которые были в старом издании, автор счел целесообразным добавить вводную главу, содержащую общие сведения о пленочных конденсаторах и сравнение синтетических пленок и конденсаторной бумаги. Автор полагает, что эта вводная глава будет полезной как для потребителей, так и для изготовителей конденсаторов, работающих над внедрением синтетических пленок в отечественное конденсаторостроение.

Библиография в новом издании начинается с публикаций, появившихся с 1962 г., т. е. продолжает библиографический список первого издания, к которому и надо обращаться читателям, интересующимся более ранними публикациями.

Автор будет удовлетворен, если его труд хотя бы в небольшой степени будет способствовать дальнейшему ускорению процесса внедрения таких новых

и перспективных диэлектриков, как синтетические органические пленки, в советское конденсаторостроение, а также расширению применения пленочных конденсаторов в нашей стране.

Автор выражает свою благодарность рецензенту В. И. Карабанову за ряд ценных замечаний.

Замечания и пожелания читателей просьба направлять по адресу: г. Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

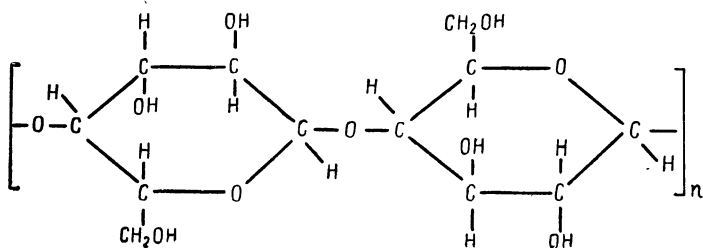
Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

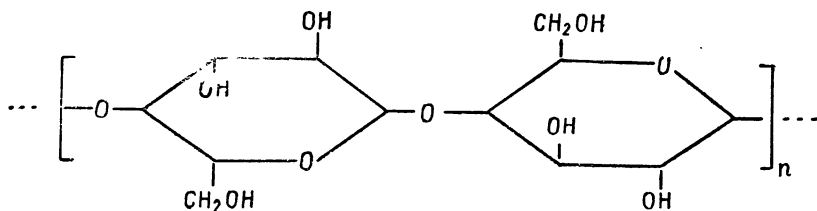
§ 1. Конденсаторная бумага и синтетические пленки

В течение многих лет бумага являлась по существу единственным твердым диэлектриком органического происхождения, широко применяемым для производства конденсаторов. Одним из больших преимуществ бумаги как конденсаторного диэлектрика являлась возможность ее изготовления в виде длинных тонких лент, смотанных в рулоны; при малой толщине эти ленты обладали достаточной механической прочностью для того, чтобы применить при изготовлении конденсаторных секций принцип их намотки на специальных станках из рулонов бумаги и тонкой металлической фольги или, позже, из бумаги, покрытой тонким слоем металла.

Большая прочность при малой толщине обуславливалась тем, что основное сырье, из которого изготавливалась бумага, а именно, древесная целлюлоза, представляла собой природное высокомолекулярное вещество, состоящее из длинных полимерных молекул, образующих стенки растительных волокон. Как известно, основным веществом, составляющим стенки растительного волокна, является так называемая альфа-целлюлоза, молекулярное строение которой может быть представлено формулой



или



Степень полимеризации n обычно превышает 1000.

Характерно, что в каждом кольце этой молекулы (глюкозном кольце) содержится по три гидроксильных группы —ОН. Наличие этих групп обуславливает полярность альфа-целлюлозы и придает конденсаторной бумаге свойства полярного диэлектрика: относительно высокую (для органических материалов) диэлектрическую проницаемость ϵ и повышенный угол потерь с характерной зависимостью его величины от температуры и частоты; для самой альфа-целлюлозы, точнее твердого вещества, образующего стенки растительных волокон, в котором содержатся также небольшие примеси лигнина и гемицеллюлоз, можно полагать $\epsilon=6,6$ и величину угла потерь при нормальной температуре и технической частоте $\operatorname{tg} \delta$ около $60\text{--}70 \cdot 10^{-4}$. При повышении температуры угол потерь немного снижается и проходит через минимум при температурах $60\text{--}70^\circ\text{C}$; далее начинается возрастание $\operatorname{tg} \delta$ за счет потерь на проводимость.

В области низких температур наблюдается дипольно-релаксационный максимум угла потерь, причем при температуре $-80\div-90^\circ\text{C}$ и частоте 50 гц достигается значение примерно $600\text{--}700 \cdot 10^{-4}$, т. е. на порядок выше, чем при нормальной температуре; в области максимума $\operatorname{tg} \delta$ наблюдается снижение ϵ при снижении температуры. При повышении частоты максимум угла потерь сдвигается в область повышенных температур; поэтому при положительных температурах угол потерь возрастает с частотой и, когда достигаются частоты около нескольких мегагерц, приобретает значение на порядок выше, чем при 50 гц.

Эти зависимости, характерные для целлюлозы, наблюдаются и для бумаги, но при сниженных значениях ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ за счет наличия большого количества пор, заполненных воздухом в сухой бумаге или пропиточной массой в диэлектрике готового конденсатора. Это обстоятельство приводит к относительному уменьшению количества полярного вещества — целлюлозы в диэлектрике, что и вызывает уменьшение ϵ до 2—3 (в зависимости от плотности) для сухой бумаги и снижение $\operatorname{tg} \delta$ до $10\text{--}20 \cdot 10^{-4}$ при частоте 50 гц и нормальной температуре. Пропитка несколько увеличивает эти значения. Применение для пропитки полярных жидкостей позволяет поднять ϵ пропитанной бумаги до

5—7. Возрастание $\operatorname{tg} \delta$ с частотой настолько значительно, что не позволяет считать бумагу высокочастотным диэлектриком.

Наличие гидроксильных групп в молекуле альфа-целлюлозы в сочетании с сильно развитой пористостью бумаги объясняет высокую гигроскопичность этого материала и резкое ухудшение электрических свойств бумаги при воздействии влажности. Для того чтобы обеспечить достаточно высокие электрические свойства бумажного конденсатора, в технологическом процессе приходится предусматривать прежде всего длительную вакуумную сушку, которая при больших размерах конденсаторов может продолжаться несколько суток, с использованием остаточного давления 10^{-3} — 10^{-4} торр.¹ Для удаления из пор сухой бумаги воздуха, снижающего электрическую прочность, далее необходима пропитка, при которой поры бумаги заполняются жидким (реже, твердым) диэлектриком. Однако пропитка не устраняет гигроскопичности бумаги, поскольку крупные молекулы пропиточной массы не проникают в субмикropopы (порядка $10 \text{ \AA}$) между молекулами целлюлозы, куда однако могут легко проникать молекулы воды с размерами примерно $2,5 \text{ \AA}$. Поэтому после пропитки бумажного конденсатора его необходимо надежно защитить от влаги, лучше всего с помощью герметизации в металлическом корпусе с проходными стеклянными или керамическими изоляторами, впаянными в крышку корпуса. Такая система влагозащиты дорога, поэтому менее ответственные типы мелких бумажных конденсаторов иногда защищаются от влаги с помощью уплотнения конструкции органической изоляцией: опрессовкой пластмассой, оукливанием, заливкой торцов эпоксидным компаундом и т. д. Однако эта система влагозащиты не обеспечивает возможности длительной работы бумажного конденсатора в условиях высокой, особенно тропической влажности.

Наличие гидроксильных групп отрицательно сказывается и на нагревостойкости бумаги, поскольку они облегчают процесс ее окисления и гидролитического распада. Обычно для бумажных конденсаторов устанавливается верхний предел рабочей температуры $+85^\circ \text{C}$. Однако при использовании нагревостойких пропиточных масс это значение можно повышать до $+100^\circ \text{C}$, а при снижении рабочего напряжения по сравнению с номинальным значением — даже до $+125^\circ \text{C}$. При этом удельный объем конденсатора соответственно возрастает.

В соответствии с нелинейной зависимостью ϵ бумаги от температуры емкость бумажного конденсатора также нелинейно зависит от температуры, что не дает возможности указать определенное значение температурного коэффициента емкости ТКЕ в рабочем интервале температур конденсатора. При пропитке полярными массами зависимость емкости конденсатора от

¹ 1 торр = 1 мм рт. ст.

температуры усиливается особенно в области низких температур. При температуре -60°C для бумажных конденсаторов при частоте 50—1000 *гц* можно наблюдать снижение емкости на 10—25% от значения, измеренного при 20°C ; при температуре 100°C в зависимости от типа пропиточной массы и плотности бумаги может наблюдаться как возрастание, так и снижение емкости до $\pm 5\%$ от ее значения при 20°C . Учитывая такие изменения емкости с температурой, а также недостаточную стабильность емкости во времени (длительное хранение в комнатных условиях дает изменение емкости до 1—2% и даже выше), следует считать нецелесообразным добиваться малого отклонения емкости от номинала при изготовлении бумажных конденсаторов, тем более, что это технологически затруднительно особенно при использовании пропитки конденсаторов, уже собранных в корпусах. Обычный допуск по емкости для бумажных конденсаторов с относительно большой емкостью составляет $\pm 10\%$; для конденсаторов малой емкости эта цифра увеличивается до $\pm 20\%$; допуск по емкости $\pm 5\%$ может быть получен лишь с большим трудом и применяется редко.

Неоднородность строения бумажного диэлектрика, характеризующегося наличием твердой и жидкой фаз, обуславливает наличие в нем явления междуслойной замедленной поляризации, связанной с перемещением свободных ионов в порах бумаги и в прослойках между слоями бумаги. Это приводит к высоким значениям коэффициента абсорбции k_a (отношение напряжения, появляющегося на выводах конденсатора через некоторое время после его кратковременного замыкания накоротко, к зарядному напряжению). При быстром заряде (примерно несколько минут) и таком же времени измерения напряжения после кратковременного разряда величина k_a для бумажных конденсаторов составляет 2—3%; при времени заряда около суток и времени измерения, составляющем несколько часов после разряда, k_a резко возрастает и достигает значений 30—32%.

Нижний предел толщины конденсаторной бумаги составляет 4 *мкм*, но при этом стоимость бумаги резко возрастает, и поэтому обычно применяемым нижним пределом для такой бумаги является 6—7 *мкм*. Надо при этом иметь в виду, что при использовании обкладок из металлической фольги бумага не может применяться в один слой вследствие неизбежного наличия в ней проводящих включений (частицы угольной пыли, меди, железа и их окислов), которые вызывают короткое замыкание обкладок. Поэтому приходится изготавливать бумажные конденсаторы минимум с двумя слоями бумаги между обкладками, а при больших емкостях, когда площадь обкладок увеличена и возникает вероятность совпадения двух проводящих частиц в разных слоях бумаги, даже с тремя слоями. Таким образом, минимальная возможная толщина диэлектрика бумажного конденсатора с фольговыми обкладками составляет 8—12 *мкм*.

Заменяя металлическую фольгу тонким слоем металла, нанесенным непосредственно на бумагу методом испарения в вакууме, т. е. при изготовлении так называемых «металло-бумажных» конденсаторов, можно использовать бумагу в один слой. В этом случае при коротком замыкании в какой-либо точке диэлектрика из-за наличия в нем проводящей частицы (или при пробое) к этой точке устремляется ток короткого замыкания со всех окружающих участков обкладки. Плотность тока возрастает по мере приближения к месту короткого замыкания и достигает таких значений, при которых плавится тонкая металлическая обкладка (толщина металлизированного слоя обычно менее 0,1 мкм). Возникающая дуга испаряет металл вокруг места короткого замыкания, а затем обрывается и гаснет; точка короткого замыкания оказывается изолированной от обкладок. Этот процесс, называемый «самовосстановлением», протекает очень быстро, за несколько микросекунд. Однако в металло-бумажных конденсаторах не может быть использован нижний предел толщины, достигнутый в производстве конденсаторной бумаги. При обычной технологии изготовления конденсаторов этого типа бумага перед ее металлизацией покрывается тонкой пленкой этилцеллюлозного лака для улучшения свойств металлизированного диэлектрика. При этом возникает опасность большого числа обрывов особо тонкой бумаги при ее прохождении через лакировальную машину, что заставляет применять для этой цели бумагу не тоньше 6 мкм. Слой лака увеличивает толщину примерно до 7 мкм; последнее значение можно принять для оценки удельной емкости металло-бумажного конденсатора.

Практически при нижнем пределе рабочих напряжений 100—200 в для бумажных конденсаторов можно получать $C_{уд}$ примерно 0,05—0,07 мкф/см³, а для металло-бумажных — 0,25—0,30 мкф/см³. Соответствующие значения удельного заряда составляют 5—7 и 40—50 мкк/см³. При высоких рабочих напряжениях характеристикой качества конденсатора является величина удельной энергии $A_{уд}$, пропорциональная произведению ϵE^2 . Для бумажных конденсаторов при значениях $E = 100$ кВ/мм, соответствующих кратковременному сроку службы, можно получать до 100 дж/л. Более высокие значения (до 300—400 дж/л) удавалось получать только для электролитических конденсаторов, но при напряжениях не выше 500 в.

При указанных выше характеристиках бумажных и металло-бумажных конденсаторов бумажный диэлектрик долгое время занимал монопольное положение в области технической частоты при изготовлении силовых конденсаторов; при использовании водяного охлаждения конденсаторы такого типа находили себе широкое применение и в электротермических установках при звуковых частотах (1—10 кГц). При постоянном и выпрямленном напряжении, не превышающем несколько сотен вольт,

крупным конкурентом бумажных конденсаторов выступили электролитические конденсаторы в тех случаях, когда можно было мириться с их повышенным током утечки; при малых емкостях вместо бумажных конденсаторов могли также применяться керамические низкочастотные конденсаторы. Тем не менее и в этой области напряжений намотанный бумажный конденсатор, не являясь монополистом, как при напряжениях технической частоты, все же служил одним из основных типов конденсаторов, изготавливаемых с диапазоном емкостей от сотен пикофард до десятков микрофард и от 160—200 в до десятков киловольт и выше.

Бумага являлась также основным диэлектриком при изготовлении импульсных и иных типов конденсаторов высокого напряжения вплоть до напряжений порядка сотен киловольт.

В настоящее время наряду с бумагой, представляющей собой материал, изготовленный из природного полимера — целлюлозы, появились пленочные диэлектрики, получаемые различными способами из синтетических полимерных материалов разного состава. Пленочные материалы подобно бумаге могут поставляться в виде тонких прочных лент, смотанных в рулоны и пригодных для изготовления конденсаторных секций путем намотки; они также могут подвергаться металлизации, хотя иногда поведение металлизированного пленочного конденсатора может несколько отличаться от металло-бумажного. Пленочные диэлектрики менее гигроскопичны, чем бумага, что упрощает процессы сушки и облегчает решение проблемы влагозащиты конденсатора. По нагревостойкости и по электрическим свойствам многие пленки уже превосходят конденсаторную бумагу, но по толщине и по величине ϵ большинство из них до последнего времени уступали бумаге, что не позволяло получать пленочные конденсаторы с такими же высокими значениями $C_{уд}$ и $A_{уд}$, как у бумажных или металло-бумажных конденсаторов. Позже был разработан относительно сложный способ получения тонких слоев синтетических материалов на специальной подложке с последующим отделением этих слоев в виде пленок, пригодных для намотки уже после их металлизации (лакопленочные конденсаторы, § 26). Теперь ряд пленок получают более легким способом в свободном виде смотанными в рулоны и с толщиной 2—3 мкм, т. е. тоньше, чем бумага. Это позволяет, даже при пониженном в сравнении с бумагой значении ϵ , получать более высокие значения удельной емкости, достигающие величин примерно 1—2 мкф/см³. Имеются некоторые перспективы и по повышению ϵ синтетических пленок, хотя они еще не выпускаются в массовом производстве. Высокая электрическая прочность многих пленок, превышающая значения $E_{пр}$ для бумаги, позволяет в некоторых случаях получать резко повышенные значения $A_{уд}$, которые, по последним сообщениям, могут достигать до 300—600 дж/л.

Таким образом, замена бумаги синтетической пленкой при сходной технологии, позволяет во многих случаях улучшить электрические свойства, удельные характеристики, повысить нагревостойкость. Казалось бы, имеются все основания для полного вытеснения бумаги синтетическими пленками из конденсаторного производства. Однако в нашей стране производство пленочных конденсаторов составляет пока лишь небольшую долю от общего объема производства намотанных конденсаторов, хотя в некоторых зарубежных странах за последнее время количество пленочных конденсаторов уже достигает десятков процентов от общего количества конденсаторов, изготавливаемых в этих странах путем намотки.

В настоящее время все синтетические пленки дороже бумаги и лишь наиболее дешевые из них приближаются по стоимости к бумаге. Это является одной из причин, затрудняющих замену бумаги пленкой. В тех случаях, когда пленка позволяет снизить размеры конденсатора и сократить количество используемого диэлектрика, может оказаться, что стоимость готового пленочного конденсатора будет ниже стоимости бумажного, хотя стоимость 1 кг пленки выше, чем стоимость бумаги. При этом приходится учитывать также возможное упрощение технологии изготовления и конструкции пленочного конденсатора по сравнению с бумажным. Другой причиной, задерживающей внедрение пленок, является относительная сложность изготовления тонкой пленки с однородной толщиной и отсутствием дефектов, требующая обычно разработки специального оборудования применительно к данному типу исходного полимера. Поэтому освоение производства исходного полимера еще не означает возможности быстрого получения соответствующей пленки, промышленный выпуск которой иногда начинается лишь ряд лет спустя после начала производства исходного полимера.

Наконец в ряде случаев сырьевая база для изготовления исходного полимера оказывается относительно узкой и не может обеспечить получение пленки в тех же количествах, в которых изготавливается конденсаторная бумага (многие тысячи тонн в год).

Поэтому еще в течение многих лет конденсаторная бумага будет находить применение в конденсаторостроении, особенно для изготовления менее ответственных и более дешевых конденсаторов. Вместе с тем синтетические пленки будут все больше и больше внедряться в конденсаторостроение сначала для создания новых типов намотанных конденсаторов, резко отличающихся от бумажных (с малыми потерями при высокой частоте, со стабильной емкостью, с высокой постоянной времени и малой абсорбцией, с высокой или повышенной нагревостойкостью и т. п.), а затем и для замены бумаги в обычных типах конденсаторов по мере снижения стоимости пленок и приближения их цены к уровню цен на конденсаторную бумагу.

§ 2. Особенности технологии пленочных конденсаторов

Несмотря на то, что процесс производства намотанных пленочных конденсаторов имеет много сходства с производством намотанных бумажных конденсаторов, все же на ряде операций могут наблюдаться существенные различия, которые следует рассмотреть. Мы это сделаем здесь применительно к отдельным этапам производства.

Намотка конденсаторных секций. В принципе намотку секций пленочных конденсаторов можно вести на тех же станках, на которых наматывают секции бумажных конденсаторов. Механическая прочность пленок близка к прочности бумаги и часто ее превосходит, так что обычно допустимы те же значения натяжения лент на станке, что и в производстве бумажных конденсаторов. Однако при заданном значении механической прочности, характеризуемой сопротивлением ленты разрыву (в кг/см^2), абсолютное значение разрывающего усилия в (кг) снижается при уменьшении ширины и толщины ленты. Поэтому появление пленок толщиной 2—3 мкм , т. е. значительно меньше чем у обычных сортов бумаги, поставило задачу создания станков облегченного типа с уменьшенным натяжением лент и уменьшенной длиной свободного движения пленки от последнего из направляющих роликов до намоточной оправки.

Бумага представляет собой относительно жесткий материал с небольшим удлинением при разрыве (около 2—3%); некоторые пленки, например полистирольная или пленка из материала САМП, имеют удлинение такого же порядка, но наряду с ними можно встретить эластичные пленки (типа фторопласта, полиэтилена и др.) с удлинением при разрыве, достигающем 100% и выше. Такие пленки могут вытягиваться в процессе намотки при достаточно большом натяжении лент, что создает известные затруднения.

Большинство пленок имеют резко увеличенное удельное объемное и поверхностное сопротивление по сравнению с непропитанной бумагой, находящейся в воздухе, даже при нормальной влажности. Это обстоятельство приводит к тому, что пленки легко электризуются при трении, причем заряды, появившиеся на поверхности пленки, долго на ней сохраняются. Следует отметить, что электризация пленок может происходить не только в процессе намотки, но и при предшествующих операциях резки, перемотки и т. п., так что пленка в рулоне, поставленная на станок для намотки, уже может быть наэлектризована.

Наэлектризованная пленка в процессе намотки притягивает частички пыли из окружающего воздуха, которые плотно пристаю к поверхности пленки и могут являться причиной пробоя пленочного диэлектрика, особенно если изготавливается однослойный пленочный конденсатор с обкладками из фольги. В отличие от бумажных конденсаторов изготовление однослойных пленоч-

ных конденсаторов возможно потому, что в большинстве случаев пленочные диэлектрики практически не содержат токопроводящих частиц, характерных для конденсаторной бумаги, а потому при намотке не должны давать короткого замыкания обкладок. Однако если намотка ведется в помещении с достаточно большим содержанием пыли (в обычных условиях воздух может содержать до нескольких тысяч пылинок на 1 л), попадание частичек пыли на пленку приводит к большому числу короткозамкнутых секций и секций, имеющих низкое пробивное напряжение.

Радикальным мероприятием для увеличения выхода годных секций при изготовлении однослойных конденсаторов, а также

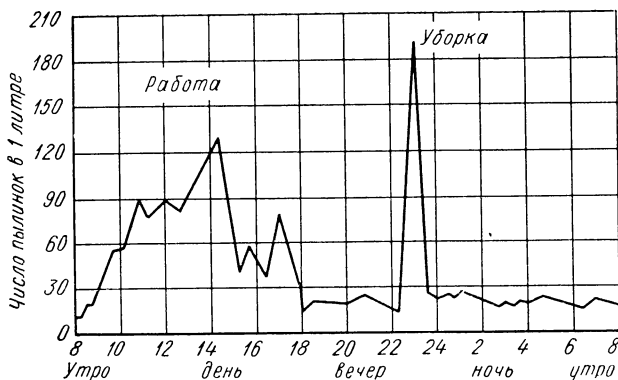


Рис. 1. Суточные изменения количества пыли в «гигиеническом» помещении (по Мак Лину)

для снижения брака и в других типах пленочных конденсаторов является практически полное обеспыливание, что достигается в так называемых «гигиенических цехах» с приточно-вытяжной вентиляцией, снабженной фильтрами для очистки проходящего воздуха, со специальным покрытием пола и окраской стен, со специальной одеждой для работающего персонала и т. д. В этих условиях можно снизить количество пыли до нескольких десятков пылинок на 1 л воздуха. Следует учесть, что даже в таких помещениях в течение рабочего дня можно наблюдать значительные колебания содержания пыли в воздухе и резкое временное повышение запыленности воздуха при уборке помещения (рис. 1).

Создание «гигиенических цехов» требует затраты относительно больших средств, поэтому в ряде случаев для защиты пленки от пыли в процессе намотки при работе в обычном цехе намоточный станок помещают в защитный чехол из органического стекла. Для устранения опасности электризации пленки в процессе ее намотки было также предложено создавать

ионизацию воздуха у поверхности пленки, способствующую стеканию зарядов и нейтрализации поверхности.

Синтетические пленки обладают резко пониженной гигроскопичностью и их емкость мало зависит от влажности окружающего воздуха даже при ее колебаниях в значительных пределах. В большинстве случаев стабильность емкости пленочных конденсаторов резко улучшена в сравнении с бумажными. В связи с этим оказывается целесообразным снабжать станки для намотки пленочных конденсаторов, особенно полистирольных, измерительными устройствами для контроля емкости и вести намотку до получения заданной емкости. В ряде случаев такие станки снабжаются автоматическими устройствами, останавливающими вращение намоточной оправки, как только будет достигнуто нужное значение емкости.

Таким образом, намотка секций пленочных конденсаторов несколько отличается от намотки секций бумажных конденсаторов; в соответствии с этим современные зарубежные фирмы, выпускающие намоточные станки для конденсаторостроения, отдельно рекламируют специальные станки для намотки секций из пленочных диэлектриков. Имеется также ряд патентов на автоматизацию таких станков.¹

Для определения числа витков намотанной секции с заданной емкостью C , так же как и при намотке бумажных конденсаторов, можно воспользоваться известными формулами:

1. Для цилиндрических секций, наматываемых на круглую оправку, диаметром D_0 число витков

$$W = \frac{2,5 \cdot 10^3 (D - D_0)}{d + d_{об}}, \quad (1)$$

где наружный диаметр секции, намотанной на оправку,

$$D = \sqrt{D_0^2 + kC} \quad (2)$$

и коэффициент, на который надо умножать емкость в формуле (2),

$$k = \frac{0,144 (d + d_{об}) d}{\varepsilon b}; \quad (3)$$

здесь C — в $мкф$; D , D_0 и b (ширина обкладки) — в $см$, а толщина диэлектрика d и толщина фольги (обкладки) $d_{об}$ — в $мм$.

2. Для плоских секций, наматываемых на тонкую плоскую оправку шириной B $см$, число витков

$$W = \sqrt{k_1 C + k_2^2} - k_2, \quad (4)$$

¹ Франц. пат., кл. H01g, № 1311298, 19.10.1962; англ. пат., кл. 100(1), (H01g), № 328271, 12.06.1963, Р. Хиндс; англ. пат., кл. 37,80(2), 100(1), (H01g), № 928272, 12.06.1963, Р. Хиндс.

где

$$k_1 = \frac{7,05 \cdot 10^3 d}{\varepsilon b (d + d_{об})} \quad (5)$$

и

$$k_2 = \frac{1,25 \cdot 10^3 B}{d + d_{об}} \quad (6)$$

Величину диэлектрической проницаемости ε , входящую в эти формулы, при использовании обкладок в виде металлической фольги надо брать несколько меньшей, чем указывается в литературе для данного типа пленки, чтобы учесть наличие воздушных зазоров между слоями пленки и между пленкой и фольгой, снижающих емкость секции. Это снижение величины ε должно составлять около 10—15%.

При намотке секций из металлизированной пленки, когда устранен воздушный зазор между обкладкой и диэлектриком, можно брать для расчета полное значение ε . При расчете числа витков для металлизированных конденсаторов по приведенным выше формулам толщину обкладки $d_{об}$ можно принимать равной нулю.

Как известно, при намотке секций с обкладками из фольги применяются две схемы намотки: со скрытой и выступающей фольгой. Во втором случае резко улучшается надежность соединения обкладки по сравнению с вкладным контактом в намотке со скрытой фольгой, поэтому намотка с выступающей фольгой обычно рекомендуется для применения при использовании конденсаторов при малых напряжениях (1 в или ниже), когда при вкладном контакте небольшое окисление поверхности обкладки или контактной фольги может привести к увеличению переходного сопротивления, возрастанию угла потерь конденсатора и даже к «обрыву» (нарушению соединения вывода с обкладкой). Эту опасность можно устранить, если проводить припайку или приварку вывода к обкладке, но это усложняет технологию и вызывает необходимость дополнительного изолирования места вывода, чтобы избежать опасности снижения электрической прочности в этом месте.

Большим преимуществом намотки с выступающей фольгой является снижение сопротивления обкладок включенного последовательно с емкостью конденсатора. Действительно, при скрытой фольге и вкладных контактах путь тока по обкладке имеет ширину, равную ширине фольги (обычно несколько сантиметров), и длину, равную длине фольги (если контакты поставлены в начале или в конце намотки), при большой емкости — до нескольких метров. При выступающей фольге длина пути тока определяется шириной обкладки, а ширина пути тока — длиной обкладки, поскольку ток подводится с торца, т. е. по всей длине фольговой ленты.

Если обозначить активное сопротивление обкладки при намотке со скрытой фольгой через r_1 , а при намотке с выступающей фольгой через r_2 , то при удельном сопротивлении материала фольги ρ , толщине фольги $d_{об}$, ширине b и длине L в первом приближении получим:

$$r_1 = \rho \frac{L}{bd_{об}} \quad \text{и} \quad r_2 = \rho \frac{b}{Ld_{об}}. \quad (7)$$

При этом отношение сопротивлений обкладки при намотке со скрытой фольгой к сопротивлению обкладки при намотке с выступающей фольгой составит:

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{L}{b} \right)^2. \quad (8)$$

Таким образом, при отношении длины ленты фольги к ее ширине, равному 100, снижение сопротивления обкладки при переходе к намотке с выступающей фольгой составит около 10 000 раз. Поскольку потери в обкладках пропорциональны их сопротивлению, можно ожидать, что при переходе к намотке с выступающей фольгой получим такое же снижение потерь. Это особенно важно при повышенных и высоких частотах, когда потери в обкладках начинают играть большую роль в общей величине потерь в конденсаторе. Поскольку конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок имеют малые диэлектрические потери и часто применяются при таких значениях частоты, когда бумажные конденсаторы уже непригодны, для них снижение потерь в обкладках путем перехода на намотку с выступающей фольгой приобретает особый интерес, хотя и сопровождается некоторым перерасходом фольги.

При намотке пленочных конденсаторов, как и при намотке бумажных, основным видом материала для обкладок является алюминиевая фольга, отличающаяся малым удельным сопротивлением, способностью легко прокатываться до малых толщин и дешевизной. Некоторые зарубежные фирмы применяют также свинцовооловянную фольгу малой толщины. Такая фольга дороже, увеличивает вес конденсатора, так как ее удельный вес значительно выше, чем алюминиевой (соответственно 8 и 2,7 г/см³), и имеет высокое удельное сопротивление (до 25 мком × см, тогда как для алюминия — менее 3 мком · см); преимуществом ее является легкость пайки, что особенно ценно при намотке с выступающей фольгой, однако сейчас разработаны достаточно технологичные методы пайки алюминия, что устраняет это преимущество; кроме того, в случае намотки с выступающей фольгой при использовании конденсатора в области высоких частот будет неудобным повышенное удельное сопротивление свинцовооловянной фольги.

В некоторых случаях преимуществом более мягкой свинцовооловянной фольги перед алюминиевой может служить умень-

шение опасности прорезания пленки краями фольги, а также ее лучшее прилегание к поверхности пленки, уменьшение воздушного зазора между обкладкой и диэлектриком и связанное с этим улучшение стабильности емкости. Видимо, эти соображения являлись основными у тех фирм, которые используют эту фольгу в производстве пленочных конденсаторов. Однако в настоящее время при правильно поставленной технологии и при использовании алюминиевой фольги можно получить вполне удовлетворительную стабильность емкости пленочных конденсаторов.

Основным преимуществом замены фольги тонким металлическим слоем, наносимым испарением в вакууме в производстве металло-бумажных конденсаторов, является свойство «самовосстановления», позволяющее резко повысить надежность конденсатора и снизить его удельный объем за счет применения уменьшенной толщины диэлектрика. В пленочных конденсаторах ряда типов металлизация может дать еще одно преимущество, которое не существенно для бумажных конденсаторов, а именно: повышение стабильности емкости за счет устранения воздушного зазора между диэлектриком и обкладкой. При этом также повышается эффективное значение диэлектрической проницаемости за счет устранения последовательно включенной емкости воздушного зазора, что может дать повышение емкости на 10—15% и соответственно сократить расход пленки обычно относительно дорогой.

Очевидно, что для полного устранения воздушного зазора необходимо металлизировать ленту диэлектрика с обеих сторон; такая лента в развернутом виде уже представляет собой готовый конденсатор с двумя обкладками, разделенными слоем диэлектрика. Однако при намотке этой ленты для ее превращения в обычную намотанную секцию возникают затруднения. Действительно, уже на первом витке произойдет соприкосновение разноименных обкладок, т. е. короткое замыкание. Можно было бы использовать при этом, кроме двусторонне металлизированной пленки, вторую, неметаллизированную пленку такой же толщины, удвоив емкость конденсатора, поскольку вторая пленка попадет в электрическое поле между разноименными обкладками первой пленки. Однако в этом случае создаются два воздушных зазора между второй пленкой и обкладками (рис. 2, а), т. е. ухудшается стабильность емкости. Этого можно избежать, если наматывать секцию из двух двусторонне металлизированных лент, сложенных одноименными обкладками (рис. 2, б) (1, 2 — слои металла, 3 — диэлектрик).

Изготовление конденсатора из одной двусторонне металлизированной ленты возможно также при отказе от принципа намотки и замены его принципом складывания ленты в виде гармоник (рис. 2, в); при этом опасность короткого замыкания обкладок устраняется, а также не вводится дополнительный

воздушный зазор, как, например, по схеме рис. 2, а. Имеются патенты на устройства для механизации процесса такого складывания металлизированных лент, например патент Дж. Ч. Гаунта¹. По-видимому, такой способ удобен при изготовлении малогабаритных пленочных конденсаторов небольшой емкости, например, для использования их в схемах микромодулей. Патентование автоматизированных методов изготовления пленочных конденсаторов из металлизированных лент, складываемых гармошкой, продолжается².

При изготовлении пленочных конденсаторов, особенно из неполярных пленок с малым углом потерь, пригодных для работы

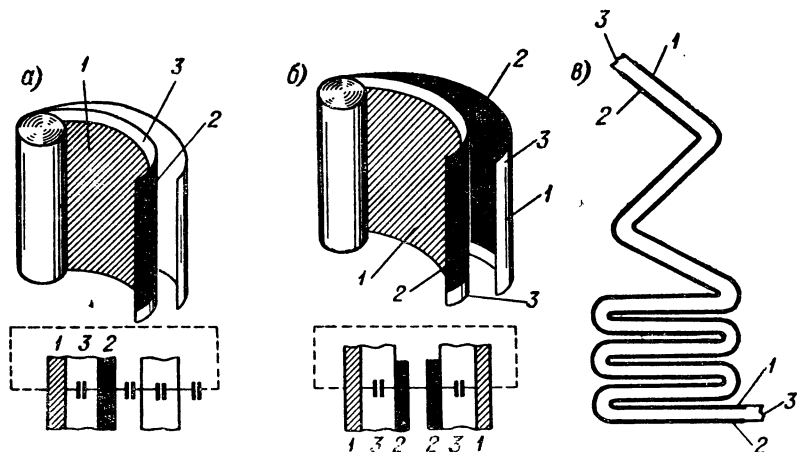


Рис. 2. Использование синтетической пленки с двусторонней металлизацией

при высоких частотах, чаще, чем при изготовлении бумажных конденсаторов приходится иметь дело с намоткой секций малой емкости. В этом случае обычно используют небольшие намоточные станки с ручным приводом, причем между лентами пленки закладывают заранее нарезанные отрезки лент фольги под заданную емкость; часто к ним уже заранее припаивают или приваривают выводные контакты.

По данным В. В. Триггса³, при ширине пленки 12 мм можно изготавливать намотанные конденсаторы с емкостью от 4700 пф и выше; уменьшая ширину и увеличивая толщину пленки, можно изготавливать намотанные конденсаторы с емкостью до 100 пф, но с малым выходом по заданному значению емкости.

Для изготовления намотанных конденсаторов малой емкости с достаточно малым допуском по емкости Триггс предложил ис-

¹ Австрал. пат., кл. 04.7, № 22218, 08.07.1959.

² Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1100814, 26.10.1961; П. Хохгейслер.

³ Англ. пат., кл. 37, № 899120, 20.06.1962.

пользовать трехобкладочную систему намотки, схема которой приведена на рис. 3.

На ленту диэлектрика 1 накладываются две обкладки 2 и 3, расположенные параллельно вдоль ленты диэлектрика; на них накладывается вторая лента диэлектрика 4, а поверх нее узкая обкладка 5, расположенная посередине лент диэлектрика и перекрывающая левый край обкладки 2 и правый край обкладки 3. Правый край обкладки 2 и левый край обкладки 3 выступают за края лент диэлектрика и используются для присоединения выводов конденсатора. Таким образом в этом конденсаторе мы имеем две емкости, включенные последовательно: между обкладками 3 и 5 и обкладками 5 и 2. Меняя ширину обкладки 5, можно изменять ширину ее перекрытия с обкладками 2 и 3 и изменять емкость в широких пределах. Можно также взять одинаковой ширину всех трех обкладок и изменять емкость, увеличивая или уменьшая число витков конденсатора или толщину пленки. Предлагались и другие методы изготовления пленочных конденсаторов малой емкости.¹

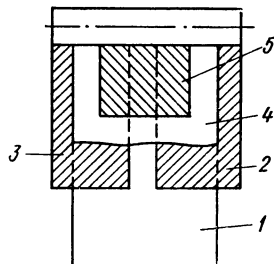


Рис. 3. Схема сечения с тремя обкладками

Во многих случаях приходится иметь дело с так называемыми ориентированными синтетическими пленками, способными сокращаться в размерах при термической обработке намотанных секций — «запекании» (см. ниже). В этом случае при намотке секций из таких пленок приходится учитывать последующее изменение емкости в процессе запекания с тем, чтобы получить нужный допуск по емкости у полностью изготовленного конденсатора.

Металлизация синтетических пленок. Процесс металлизации пленок в производстве конденсаторов, как и при металлизации конденсаторной бумаги, проводится путем испарения металла в вакууме на такого же типа установках, которые применяются при изготовлении металлобумажных конденсаторов. Вместе с тем приходится учитывать, что некоторые типы синтетических пленок, например политетрафторэтилен (фторопласт-4), не обладают должным сцеплением с осаждаемым на них тонким слоем металла и требуют специальной обработки поверхности перед металлизацией. Однако большинство синтетических пленок, применяемых современным конденсаторостроением, легко подвергаются металлизации и в отличие от бумаги обладают тем преимуществом, что для них отпадает необходимость предварительной лакировки перед металлизацией.

¹ Пат. США, кл. 317—260, № 3366853, 27.06.66, 30.01.1968.

Другой особенностью, которую надо учитывать при изготовлении металлизированных пленочных конденсаторов, является то, что не все синтетические пленки обладают той же способностью к самовосстановлению при пробое, как металлизированная бумага. Если в случае однослойного металло-бумажного конденсатора удастся получать многие тысячи пробоев, завершающихся самовосстановлением, то для ряда металлизированных пленочных конденсаторов уже после нескольких пробоев может наступить короткое замыкание обкладок. Во многих случаях, постепенно увеличивая напряжение, приложенное к металло-бумажному конденсатору, за счет постепенного сокращения

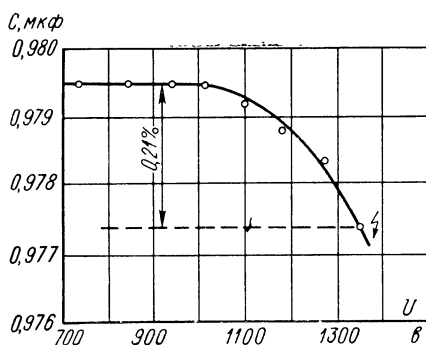


Рис. 4. Зависимость емкости металлопленочного конденсатора от напряжения

площади его обкладок в процессе деметаллизации при самовосстановлениях, можно привести его к выходу из строя вследствие появления обрыва после значительной потери емкости; в то же время для некоторых металлопленочных конденсаторов после небольшой потери емкости (порядка нескольких процентов или даже долей процента) происходит окончательный пробой и закорачивание обкладок. На рис. 4 показана зависимость емкости полистирольного металлопленочного конденсатора типа МПГО (1 мкФ на 250 в) от напряжения, которое повышалось ступенями с выдержкой на каждой ступени 2 мин, с последующим измерением емкости в конце каждой ступени.

Исследование причин различия процесса самовосстановления в металло-бумажных и металлопленочных конденсаторах было проведено в 1964 г. Каммермайером.

Изучение продуктов разложения бумаги и синтетических пленок с помощью газовой хроматографии показало, что для разных материалов может наблюдаться существенное различие. Фактограммы, приведенные на рис. 5, показывают, что для бумаги, триацетата целлюлозы и полиэтилентерефталата a характерно большое выделение окиси углерода CO , тогда как для поликарбоната b , и особенно для полистирола $в$, количество выделяемой CO снижено. Дополнительные исследования инфракрасных спектров показали также наличие ацетилена C_2H_2 , образующегося как продукт расщепления метана при высокой температуре.

Сравнение опытных данных о составе выделяющихся газов с результатом теоретического расчета, основанного на составе

молекул исследуемых веществ и предположении об отсутствии твердого остатка при распаде молекул, дали удовлетворительное совпадение для бумаги, триацетата и ПЭТФ; для поликарбоната и полистирола расчетное количество C_2H_2 оказалось выше опытного. Таким образом, у этих материалов, особенно у полистирола, при разложении образуется только часть возможного количества ацетилена. Можно думать, что в плазме искры, образующейся при пробе, диэлектрик расщепляется на атомы и ионы,

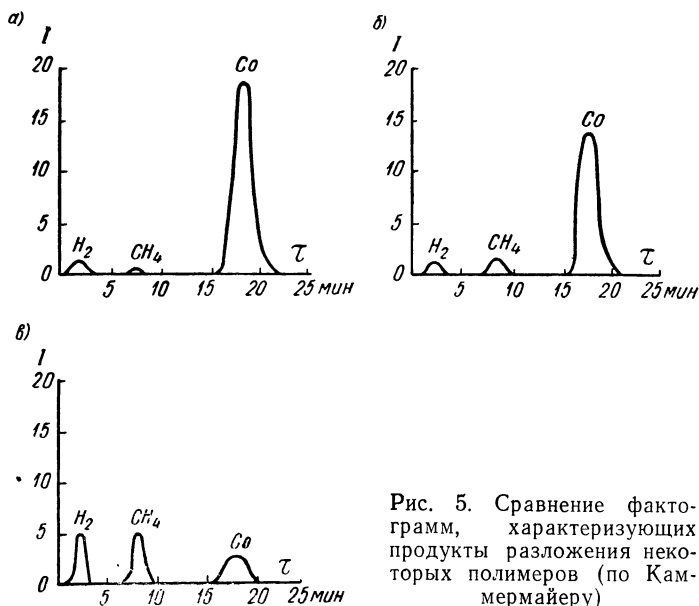


Рис. 5. Сравнение фактограмм, характеризующих продукты разложения некоторых полимеров (по Каммермайеру)

которые при охлаждении связываются, образуя низкомолекулярные газы: $C + O \rightarrow CO$, $2C + 2H \rightarrow C_2H_2$. При этом недостаточное (по сравнению с теоретическим) выделение C_2H_2 должно свидетельствовать о выделении в месте пробоя свободного углерода. Последний может образовывать проводящие мостики, нарушающие эффект деметаллизации и приводящие к короткому замыканию.

При наличии в молекуле вещества значительного количества атомов кислорода выделяемый при разложении углерод будет связываться в виде газообразной окиси углерода, что должно улучшать процесс самовосстановления конденсатора. Поэтому полезно сопоставить для исследуемых материалов относительные количества кислорода и углерода, содержащиеся в их молекулах. Это сделано в табл. 1.

Данные табл. 1 показывают, что наихудшие условия для самовосстановления должны иметь место для полистирола и

Таблица 1

Исследуемый материал	Состав	Относительное содержание кислорода: O/C
Бумага (целлюлоза)	$(C_6H_{10}O_5)_n$	0,83
Триацетат целлюлозы	$(C_{12}H_{16}O_8)_n$	0,66
Полиэтилентерефталат	$(C_{16}H_8O_4)_n$	0,40
Поликарбонат	$(C_{16}H_{14}O_3)_n$	0,19
Полистирол	$(C_8H_8)_n$	0,00

в меньшей степени для поликарбоната. Полиэтилентерефталат и триацетат целлюлозы уже близки к бумаге. Этот вывод подтверждается практикой изготовления металлизированных конденсаторов.

Учитывая данные, приведенные в работе Каммермайера, при изготовлении тонкослойных полистирольных конденсаторов было

предложено использовать комбинацию из полистирола и какого-либо другого полимера с лучшей способностью к самовосстановлению при пробое.¹ Для этой цели на подложку, удаляемую перед намоткой конденсатора (см. § 26), сначала наносится пленка 1 полимера, обладающего способностью к самовосстановлению при пробое (рис. 6). Далее наносится тонкий слой металла 2 с закраиной у одной стороны

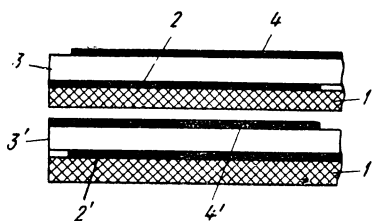


Рис. 6. Устройство полистирольного металлизированного конденсатора по патенту Гёнге

ленты. Поверх металлического слоя наносится пленка полистирола 3, а поверх нее второй слой металла 4, но с закраиной, сдвинутой к противоположной стороне ленты. Для намотки используют две такие ленты, расположенные так, чтобы пленки полистирола 3 располагались между разноименными обкладками 2 и 4, а пленки хорошо самовосстанавливающегося полимера 1 — между одноименными обкладками 2—4' и 4—2'. При такой конструкции не представляет опасности то обстоятельство, что хорошо самовосстанавливающийся полимер может иметь электрические свойства, в частности $\text{tg } \delta$ много хуже, чем полистирол.

Сравнительное исследование процесса самовосстановления на образцах металлизированной бумаги и металлизированных пленок (поликарбоната ПК и полиэтилентерефталата ПТЭФ) были проведены Л. Леда в 1967 г. Для исследования использовалась установка, на которой напряжение к металлическому

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1181326, 01.07.1965, Ф. Гёнге.

слою подводилось с помощью иглы. Было установлено, что при испытании пленок (так же как и бумаги) наблюдается влияние полярности иглы: при отрицательной игле деметаллизованная площадь обычно несколько больше, но имеет сплошной компактный характер (а); при положительной игле наблюдаются разветвления, напоминающие дендриты, и площадь деметаллизации не является сплошной (б) (рис. 7). У бумаги дендриты более разветвлены, чем у пленок, по-видимому, из-за большей неровности поверхности бумаги.

Как известно, в производстве металлобумажных конденсаторов в промышленном масштабе для металлизации бумаги ис-

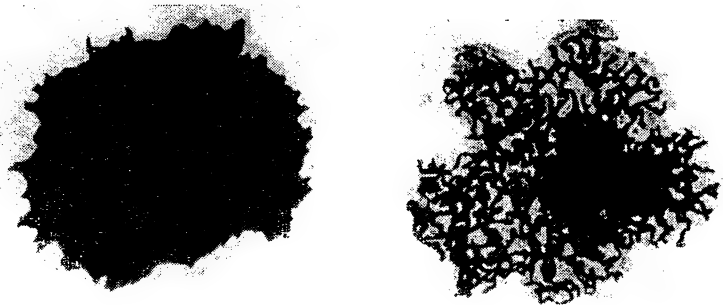


Рис. 7. Влияние полярности иглы на характер участка деметаллизации (по Леда) (увеличено в 40 раз)

пользуют только два металла: цинк (с подслоем из серебра или олова) и алюминий. Эти же два металла были использованы и в производстве металлопленочных конденсаторов, хотя в последнее время для металлизации пленок чаще применяют алюминий. Преимуществом цинка является его резко сниженная температура кипения по сравнению с алюминием (соответственно, 350 и 1400°С), что снижает расход энергии на испарение, а также дает возможность работать при более высоких значениях остаточного давления, т. е. использовать более простое оборудование. Кроме того, скорость наращивания слоя цинка выше, чем алюминия, что повышает производительность. В соответствии с этим покрытие цинком обходится дешевле, чем покрытие алюминием. К этому можно добавить, что при работе с алюминием оказалось проблемой подобрать материал тигля, в котором можно было бы его расплавлять перед испарением, так как этот материал активно взаимодействует со всеми веществами, которые можно было бы использовать для изготовления тиглей (графит, керамика, тугоплавкие металлы и т. п.). Задача была решена использованием алюминиевой проволоки, которая непрерывно подается к нагревателю и испаряется с него без

разогрева алюминия в тигле. Сравнение схем испарения цинка и алюминия дано на рис. 8.

Вместе с тем алюминий имеет и ряд преимуществ по сравнению с цинком. К ним относится прежде всего его устойчивость к коррозии, что сильно упрощает хранение бумаги (или пленки), металлизированной алюминием, а также ее транспортирование. Мы уже упоминали повышенную проводимость алюминия ($\rho_{\text{Zn}} \approx 6 \text{ мком} \cdot \text{см}$, а ρ_{Al} менее $3 \text{ мком} \cdot \text{см}$). К этому надо добавить, что окись алюминия — диэлектрик, а окись цинка — полу-

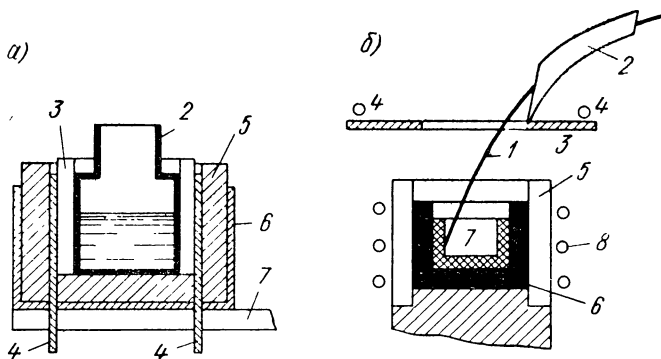


Рис. 8. Схема испарения металлов при металлизации синтетических пленок: а — испарение цинка

(1 — цинк; 2 — графитовый тигель; 3 — кварцевая труба; 4 — танталовый нагреватель; 5 — алюминиевый тигель; 6 — металлический корпус; 7 — стеклянное основание вакуумной камеры);

б — испарение алюминия

(1 — алюминиевая проволока; 2 — направляющая трубка; 3 — экран; 4 — медная трубка, охлаждаемая водой; 5 — кварцевая трубка; 6 — графитовый тигель; 7 — борид титана; 8 — индукционный нагрев)

проводник. Это имеет значение потому, что на деметаллизированной площади, окружающей место пробоя, всегда могут быть следы окислов металла, а с применением цинка эти следы будут проводящими. Кроме того, имеются сведения о том, что при рекристаллизации цинк может давать тонкие длинные кристаллы — «усы», которые могут приводить с течением времени к короткому замыканию обкладок в месте самовосстановления. Поэтому заранее можно ожидать лучших электрических свойств особенно сопротивления изоляции для конденсаторов, металлизированных алюминием, что и определило расширение его применения в последние годы, несмотря на то, что этот способ металлизации дороже металлизации цинком.

В свете этих рассуждений представляет большой интерес работа по сравнительному исследованию пленочных конденсаторов (пленки ПК и ПЭТФ), металлизированных цинком и алюминием, выполненная в 1968 г. французским исследователем

Брагье. Им было исследовано несколько сотен конденсаторов, изготовленных из пленок толщиной 6 и 12 мкм, металлизированных указанными двумя металлами. В качестве подслоя для цинка применялось серебро. Сразу после изготовления, до испытаний на старение, как для ПЭТФ, так и для ПК, в случае использования алюминия были получены улучшенные значения электрических свойств.

В среднем при алюминии угол потерь был на 20% ниже, а сопротивление изоляции на 30% выше, чем у цинка. Однако эти начальные преимущества алюминия, по данным Брагье, практически исчезли при испытании на старение. Температурное старение (без напряжения) проводилось в течение двух суток, причем температура изменялась в первые сутки от +20 до -40 и -10°С с возвращением к +20°С, а во вторые сутки от +20 до +60 и +100°С, с возвращением к +20°С. Для обеих пленок были получены близкие результаты: цинк дал лучшие результаты по стабильности угла потерь и сопротивления изоляции, но несколько уступал алюминию по стабильности емкости, особенно при повышенной температуре; различие в общем оказалось небольшим.

Результаты одного из опытов на старение под напряжением (пленки 6 мкм, температура +125°С, напряжение 272 в, кроме данных для сопротивления изоляции, взятых для 160 в) приведены на рис. 9 (1—ПК—Al, 2—ПК—Zn, 3—ПЭТФ—Al, 4—ПЭТФ—Zn). Общее число отказов N учитывало как катастрофические отказы, так и отказы по уходу параметров (для ПЭТФ ΔC более 5%, $\operatorname{tg} \delta$ более $110 \cdot 10^{-4}$ и $R_{\text{из}}C$ ниже $10^4 \text{ ом} \cdot \phi$; для ПК ΔC более 3%, $\operatorname{tg} \delta$ более $30 \cdot 10^{-4}$ и $R_{\text{из}}C$ менее $2 \cdot 10^4 \text{ ом} \cdot \phi$). Возможно, что резко увеличенное число отказов для пленки ПК вызвано более жестким подходом к допустимому уходу параметров.

Брагье сделал вывод о том, что при длительном старении в среднем цинк дает результаты несколько более устойчивые, чем алюминий, причем начальное преимущество алюминия исчезает. Однако этот вывод нельзя считать достаточно правильным, так как в этом исследовании не учтено поведение конденсаторов при длительном хранении без напряжения или при работе при напряжении, резко пониженном по сравнению с номинальным, когда особенно ярко должны были проявиться недостатки цинка.

Термическая обработка («запекание») конденсаторов, намотанных из синтетических ориентированных пленок. Большинство синтетических пленок, используемых в современном конденсаторостроении, для улучшения механической прочности подвергаются двусторонней ориентации в процессе их изготовления, которая осуществляется вытяжкой нагретой пленки с последующим охлаждением в вытянутом состоянии. Если вести вытяжку только в одном направлении, то в последнем прочность будет

повышена, но в перпендикулярном направлении резко ослаблена и даже может наблюдаться расслоение пленки; поэтому обычно при получении ориентированных пленок проводится вытяжка в двух направлениях.

Вытяжка пленки не только повышает ее механическую прочность, но дает пленке технологическое преимущество, позволяю-

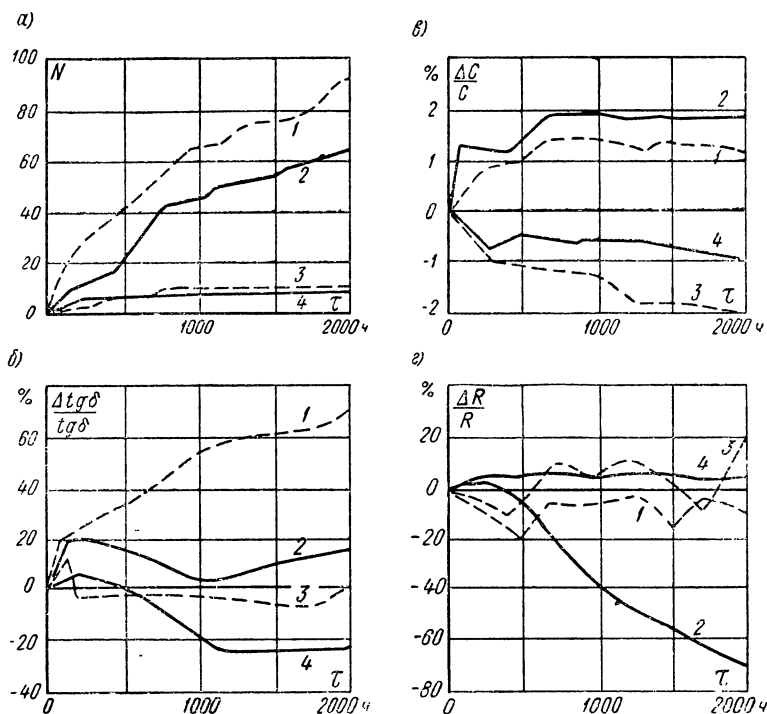


Рис. 9. Результаты исследований старения однослойных металлизированных пленочных конденсаторов (пленка 6 мкм) при температуре 125°С и напряжении 272 в (по Бразье)

щее путем специальной термической обработки повысить стабильность емкости намотанного из нее конденсатора. Дело в том, что при нагревании ориентированной пленки до температуры ее размягчения она стремится вернуться в исходное состояние. При этом длина пленки сокращается, а ширина и толщина несколько возрастают.

Это обстоятельство можно использовать для вытеснения воздуха из зазоров между витками конденсаторной секции, намотанной из ориентированной пленки, путем ее прогрева определенное время при температуре, близкой к температуре размягчения пленки. При этом несколько возрастает емкость секции (за счет исключения емкости воздушного зазора, включенного

последовательно с емкостью, создаваемой пленкой, и уменьшающего поэтому общую емкость) и значительно увеличивается стабильность емкости как во времени, так и при изменениях температуры.

При использовании обкладок из металлической фольги и намотке со скрытой обкладкой в процессе запекания происходит характерная деформация секции; в месте расположения изолированных краев, у торцов секции, где фольга отсутствует, происходит характерная усадка пленки по диаметру секции; если температура запекания достаточно высока, то на этих участках витки спекаются и торцы секции оказываются как бы оплавленными («остекловываются»), что повышает влагостойкость секции и часто позволяет применять подобные конденсаторы без добавочной влагозащиты. Деформация такого рода особенно заметна у полистирольной пленки, обладающей малой нагревостойкостью; для других ориентированных пленок с более высокой температурой размягчения эта деформация часто выражается значительно слабее.

Обычно при намотке секций после снятия с намоточной оправки в секции остается внутреннее отверстие (см. § 3), что создает опасность смещения части материала секции в объем, занятый этим отверстием, в процессе запекания. При этом сжатие витков может уменьшиться, и емкость конденсатора в процессе запекания не только не увеличится, но даже немного снизится.

В производстве пленочных конденсаторов рекомендуется применять отожженную алюминиевую фольгу. Некоторые фирмы, как указывалось выше, применяют при изготовлении пленочных конденсаторов даже дорогую свинцовооловянную фольгу из-за ее повышенной мягкости.¹

Процесс запекания применяется теперь не только в производстве полистирольных конденсаторов, но и при изготовлении конденсаторов из других типов ориентированных пленок (ПЭТФ, ПК и др.), причем, очевидно, температуру запекания необходимо выбирать в соответствии с температурой размягчения пленки. Следует иметь в виду, что процесс запекания пленочных конденсаторов, приводящий к вытеснению воздуха из зазоров между витками конденсатора и между пленкой и фольгой, не позволяет существенно повысить напряжение начала ионизации, хотя и дает некоторое снижение интенсивности ионизации. Известно, что о начале ионизации можно судить по перегибу кривой зависимости угла потерь от напряжения; такие кривые для незапеченной секции (1) и такой же секции, прошедшей режим запекания (2), показаны на рис. 10; запекание не дало существенного изменения места перегиба кривой, хотя и снизило рост угла потерь после перегиба в соответствии

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1001418, 30.04.1964, Ф. Финк.

с уменьшением содержания остаточного воздуха в секции и ослаблением интенсивности ионизации.

Исследования С. Н. Койкова, М. А. Матевосяна, Ш. Т. Абзианидзе и других авторов показали, что пленочные диэлектрики обладают пониженной короностойкостью и быстро разрушаются под действием частичных разрядов, развивающихся в процессе ионизации остаточных воздушных включений. Поэтому при переменном напряжении, особенно при повышенной частоте, запеченные пленочные конденсаторы должны применяться при напряжениях ниже порога ионизации (обычно ниже

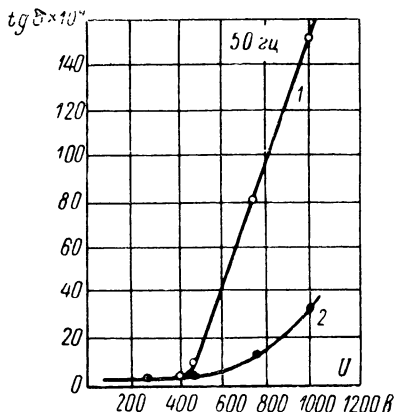


Рис. 10. Зависимость угла потерь секций полистирольных конденсаторов от напряжения

1 — незапеченная секция; 2 — запеченная секция

эффективного значения напряжения порядка 250 в), поскольку, как указано выше, после запекания в секции все же сохраняется остаточный воздух, хотя и в меньшем количестве, чем до запекания. При постоянном напряжении, когда процесс ионизации резко ослаблен, пленочные запеченные конденсаторы применяют и при более высоких напряжениях, но обычно не выше 1000—1500 в; известны лишь отдельные случаи изготовления конденсаторов малой емкости (сотни пикофарад) при сильном запекании, приводящем к «остекловыванию» секции, рассчитанных на работу при напряжениях 10—15 кВ).

Для повышения напряжения начала ионизации пленочных конденсаторов было предложено¹ проводить процесс запекания секций, погруженных в нагревостойкий гидрофобный жидкий диэлектрик с высокими электрическими свойствами, например в полисилоксановую жидкость. Температуру запекания рекомендуется брать близкой к температуре размягчения пленки, а время запекания от 3 мин до 3 ч. При этом достигается как повышение напряжения начала ионизации, так и повышение устойчивости конденсатора к воздействию влажности. Для тех же целей в Японии было предложено² проводить запекание секций полистирольных конденсаторов, погруженных в расплавленный парафин при температуре 100—110° С. Указывается, что если обычный полистирольный конденсатор емкостью 2000 пф

¹ Пат. ПНР, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 51976, 15.09.1966, Я. Зак, К. Хойновска, Й. Медовски.

² Японск. пат., кл. 59E1022, № 3941, 13.02.1967, ЯбусакИ Сюньити, Фудзико Сигэаки.

в условиях повышенной влажности изменяет емкость на 1—2%, то при использовании данного предложения в тех же условиях емкость изменяется только на 0,2—0,5%.

Сушка и пропитка пленочных конденсаторов. Обычным средством для повышения электрической прочности и напряжения начала ионизации является пропитка намотанных секций при достаточно глубоком вакууме, позволяющем заменить воздух в зазорах между слоями пленки и фольги жидким диэлектриком. Перед пропиткой должна проводиться сушка для удаления влаги, которая может содержаться в небольших количествах в пленочном диэлектрике и ухудшать его электрические свойства хотя и не в такой мере, как у сильногигроскопичной бумаги. Процессы сушки и пропитки у пленочных конденсаторов заметно отличаются от аналогичных процессов в производстве конденсаторов с бумажным диэлектриком. Значения температур, при которых должны проводиться эти процессы, могут быть как ниже, так и выше тех, при которых ведется сушка и пропитка бумажных конденсаторов в соответствии с температурой размягчения используемой пленки и ее устойчивости к окислению. В связи с резко уменьшенным влагосодержанием в пленочном диэлектрике время сушки, очевидно, может быть заметно снижено в сравнении с временем сушки бумаги. Пропитка пленочного конденсатора также имеет иной характер, так как, если в бумажном конденсаторе впитывание пропиточной массы происходит прежде всего в порах самой бумаги, то в пленочном пропитка ограничивается обычно заполнением массой зазоров между слоями пленки и фольги, а сама пленка может поглотить лишь ограниченное количество пропиточной жидкости и то только в том случае, если обладает свойством набухания в этой жидкости.

В отличие от бумаги некоторые пленки способны растворяться и разрушаться в обычных типах пропиточных масс, что необходимо иметь в виду при выборе жидкости для пропитки пленочных конденсаторов данного типа. Следует также иметь в виду, что многие пленки не смачиваются обычными пропиточными жидкостями, а это весьма затрудняет пропитку конденсаторов, намотанных из таких пленок. В этом случае часто прибегают к использованию комбинированного диэлектрика из пленки и бумаги, в котором бумага играет роль фитиля, всасывающего пропиточную массу внутрь секции (см. § 22 и 23). Такую же роль может играть бумага, металлизированная с двух сторон и применяемая в конденсаторе вместо обкладок из фольги¹. В этом случае, кроме облегчения пропитки, достигается также способность конденсатора к самовосстановлению при пробое.

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 3946784, 10.10.1967, П. Робинзон.

По-видимому, явление электризации пленок при намотке может вызывать затруднение при пропитке из-за плотного слипания слоев пленки в многослойном диэлектрике, препятствующего проникновению жидкого диэлектрика в зазоры между слоями. Для того чтобы избежать этого и облегчить пропитку конденсаторов переменного тока из синтетических пленок (полипропилена, поликарбоната, полиэтилентерефталата и др.) жидкими диэлектриками (полиизобутиленом, полисилоксаном, хлорированным дифенилом и т. д.), было предложено¹ покрывать пленку тонким гомогенным слоем мелкодисперсного неорганического диэлектрика, в частности окиси алюминия, с диаметром частиц 0,5 мкм или создавать неровности на поверхности пленки специальной обработкой.²

Однако надо иметь в виду, что эффективное значение диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора может при этом несколько снизиться за счет увеличения зазоров между слоями вследствие наличия на поверхности пленки частиц неорганического диэлектрика или небольших неровностей, созданных обработкой.

Процесс запекания секций пленочных конденсаторов, закрывающий их торцы, исключает возможность пропитки, поэтому пропитывать следует незапеченные секции. При этом надо иметь в виду, что наличие жидкого диэлектрика в зазорах между слоями пленки может приводить к появлению в диэлектрике процесса замедленной междуслойной поляризации, особенно заметного при недостаточной степени очистки пропиточной жидкости, т. е. при увеличенном содержании в ней свободных ионов. Движение этих ионов в пределах зазора между слоями пленки, заполненного жидкостью, в переменном электрическом поле вызывает дополнительные потери и увеличивает угол потерь конденсатора в области низких напряженностей поля, а при постоянном напряжении вызывает повышение коэффициента абсорбции k_a до 2—5%, тогда как у непропитанных конденсаторов из неполярных пленок он обычно ниже 0,1%, а в случае полярных пленок — ниже 0,5%.

Отсутствие запекания при пропитке пленочных конденсаторов должно также ухудшать стабильность их емкости и может заметно изменять величину температурного коэффициента емкости по сравнению с непропитанными запеченными конденсаторами.

§ 3. Особенности конструкции пленочных конденсаторов

Различие в свойствах конденсаторной бумаги и синтетических пленок накладывает также известный отпечаток и при разработке конструкции пленочных конденсаторов, которая в ряде

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 3340446, 5.09.1967, Э. Кокс.

² Пат. США, кл. 317—258, № 3430116, 25.02.1969, П. Джонстон.

случаев имеет некоторые особенности, отличающие ее от конструкции обычных бумажных конденсаторов.

Намотанная цилиндрическая секция с центральным отверстием. Намотка секций обычно производится на оправку круглого сечения, а потому, после того как секция снята с оправки, в ней остается центральное осевое отверстие, диаметр которого определяется диаметром оправки.

Многие типы пленочных конденсаторов, например полистирольные или поликарбонатные, изготавливаются с узким допуском по емкости, и от них требуется высокая стабильность емкости во времени; вместе с тем в отличие от бумаги эти пленки термопластичны и размягчаются при нагревании, в частности в процессе «запекания», пайки выводов и т. п. технологических операциях. При этом наличие внутреннего отверстия может приводить к деформации секции и такому изменению ее емкости, которое уже может считаться недопустимым для конденсаторов данного типа.

Некоторые фирмы для повышения стабильности емкости, например при использовании конденсаторов в фильтрах телефонной аппаратуры, производят намотку на металлические втулки, которые снимаются с намоточной оправки вместе с намотанной секцией. Применение таких втулок утяжеляет и удорожает конденсатор; предложено вместо металлической втулки применять тонкий металлический сердечник с шероховатой поверхностью, который служил бы намоточной оправкой, а далее вынимался бы из головки намоточного станка вместе с секцией.¹ Был сделан также ряд предложений, в которых задача фиксации размеров внутреннего отверстия в секции решалась бы одновременно с улучшением надежности контактного узла².

Были выдвинуты также идеи об отказе от применения металла для фиксирования размеров осевого отверстия секции. Например, предлагалось³ наматывать секции на оправку весьма малого диаметра; при этом отверстие будет настолько мало, что исчезнет в процессе запекания секций. По другому патенту⁴ предлагалось вставлять в отверстие круглый брусок из полистирола. Наконец, было предложено⁵ опрессовывать намотанную секцию термопластичным полимером, например полиэтиленом, с таким расчетом, чтобы полимер сначала заполнял внутреннее отверстие в секции, а затем уже образовывал на ее поверхности наружную защитную оболочку. Предлагалось также⁶ в начале

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H01g), № 971395, 22.01.1959, Ф. Финк.

² Франц. пат., кл. H01g, № 1171905, 03.02.1959, А. Серф; франц. пат., кл. H01g, № 1125012, 23.10.1956, А. Пижонье.

³ Пат. ФРГ, кл. 21g, (H01g), № 917829, 02.04.1959, Ф. Финк.

⁴ Англ. пат., кл. 37, № 748900, 16.05.1956, Дж. Фарнсуорт.

⁵ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 964705, 28.05.1957, Г. Луц, К. Хантль.

⁶ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H01g), № 976456, 19.09.1963, К. Носс, П. Хеннигер.

намотки между витками пленки наматывать несколько витков лакированной бумаги — материала, не дающего усадку при нагреве и обеспечивающего стабильность размеров внутреннего осевого отверстия в процессе запекания.

Фиксирование диаметра внутреннего отверстия устраняет опасность смещения витков секции в направлении к ее оси, но остается возможность их расширения в противоположном направлении, т. е. в сторону наружной поверхности секции, что также даст изменение емкости. Для предупреждения этой возможности было предложено¹ при изготовлении пленочных кон-

денсаторов стабильной емкости стягивать их наружным бандажом.

Если режим запекания выбран обоснованно и соблюдается правильно, а опасность сильного перегрева секции, способного вызвать перемещение внутренних витков секции в свободное пространство внутреннего отверстия секции, исключена, то весьма возможно, что опасения о вредном влиянии этого отверстия на стабильность емкости при небольших колебаниях температуры являются преувеличенными.

В 1968 г. Лаубер выполнил теоретический расчет температурных изменений емкости намотанного пленочного конденсатора с учетом расширения материалов (пленки и фольги) при нагревании и тех механических напряжений, которые возникают при этом в конденсаторной секции. Полученные расчетные формулы он использовал для вычисления температурного коэффициента емкости полистирольного конденсатора со свободным внутренним отверстием 1 и конденсатора, намотанного на латунную втулку 2 (рис. 11). Влияние наличия втулки на величину ТКЕ оказалось незначительным.

Обеспечение надежности выводов в пленочных конденсаторах. В производстве пленочных конденсаторов чаще, чем в производстве бумажных, приходится иметь дело с конденсаторами малых размеров. С одной стороны, это обусловлено тем, что неполярные пленки с малым углом потерь позволяют получать высокочастотный тип намотанного конденсатора, а с ростом частоты требуемые для радиочепей значения емкостей сни-

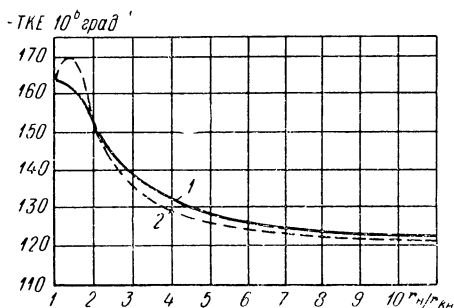


Рис. 11. Зависимость температурного коэффициента емкости полистирольного конденсатора от величины отношения наружного радиуса секции к радиусу внутреннего отверстия

¹ Пат. США, кл. 317—242, № 30428845, 03.07.1962, М. А. Розенберг.

жаются. С другой стороны, при использовании полярных пленок небольшие емкости изготавливать проще, чем в случае применения бумаги, так как во многих случаях можно использовать упрощенные системы влагозащиты, а потому нижний предел номинальных емкостей для пленочных конденсаторов обычно снижен по сравнению с бумажными.

При малых размерах конденсатора получение надежного контакта между выводом и обкладкой затрудняется, а потому конструкторская мысль работает в направлении разрешения этого затруднения. Во многих случаях в производстве пленочных конденсаторов используется намотка с выступающей фольгой. При этом края фольги, выступающие с торца секции, сминаются и к ним припаивается выводной проводник, причем должна быть обеспечена достаточная механическая прочность его закрепления на торце секции.

Согласно патенту Р. Ф. Калины¹ при намотке пленочных конденсаторов предлагается использовать легкоплавкую фольгу из сплава 40—90% олова, 50—80% свинца и 2% сурьмы. После намотки секции производится ее термическая обработка (запекание) для того, чтобы вызвать усадку ориентированной пленки и обеспечить монолитность секции. Далее секция укрепляется в специальном зажиме и к ее торцам подводятся два цилиндра, вращающиеся в противоположные стороны. Торцы этих цилиндров, в которых сделаны неглубокие выточки по размеру торцов секции, прижимаются к фольге, выступающей с двух сторон секции, сминают ее, оплавливают и превращают выступающую часть фольги в сплошной металлический диск, которым заканчивается торец секции с каждой стороны. Оплавление фольги достигается за счет тепла, выделяемого при трении. К заплавленной на торце фольге легко может быть припаян выводной проводник.

Если выводной проводник держится только на пайке, то надежность его в механическом отношении не очень высока. Поэтому в ряде патентов предлагается использовать центральное осевое отверстие секции для механического закрепления проводочного вывода, деформированный конец которого предлагается вставлять в отверстие секции так, чтобы отогнутый конец ложился на фольгу, выступающую на торце секции, или на слой контактного металла, нанесенного на торец секций металлизированных конденсаторов, и мог далее быть электрически присоединен путем пайки². Такие же выводы можно использовать и при намотке со скрытой фольгой, припаявая к ним концы контактных полосок фольги, вложенных в секцию и контактирующих с обкладками.

Если на торцы секции нанесен контактный слой, закрывающий всю поверхность торца, то обычно приходится припаивать

¹ Пат. США, кл. 29—25.42, № 3237274, 1.03.1966.

² Англ. пат., кл. 37, № 909817, 07.11.1965. Д. Х. Скойнс, Дж. А. Лангли.

к торцам осевые проводники, расходящиеся аксиально в обе стороны от секции. Для улучшения надежности крепления таких проводников и увеличения проводимости контактного узла было предложено¹ использовать дисковые выводы 1 (рис. 12), соединенные с наружной стороны с выводным проводником 2, а с другой стороны, прилегающей к торцу секции конденсатора, с небольшим коническим выступом 3. Такой вывод прижимается к концу секции 4 в нагретом виде. При этом выступ 3 вплавляется в пленку (в пределах закраины секции), а дисковый вывод приплавляется к фольге, выступающей с торца секции. В этом случае в качестве обкладок должна применяться легкоплавкая свинцовооловянная фольга.

Когда в качестве обкладок применяется алюминиевая фольга (или слой алюминия, нанесенный на поверхность пленки), то

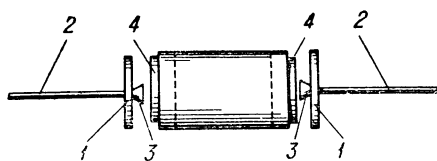


Рис. 12. Дисковые выводы для секций с выступающими обкладками, по патенту Мак Грау

обычно выступающие с торца секции края обкладки покрываются путем шоопирования припоем для облегчения последующей припайки выводного проводника к торцу секции. Для улучшения контакта между фольгой (или выступающими краями металлизированного слоя) и напыленным слоем припоя предлагается² предварительно напылять переходный

слой чистого алюминия, а уже на него наносить слой свинцовооловянного припоя желательно с добавкой сурьмы, меди или цинка.

Поскольку при изготовлении пленочных конденсаторов применяются термопластичные пленки, т. е. размягчающиеся при нагреве, возникла идея вплавлять проволоочный вывод в торец секции в том его участке, где находятся пленка и обкладка только одного знака. Эта идея была высказана для конденсаторов из полиэтилентерефталатной пленки, но пригодна для использования и в случае других пленок.

По-видимому, один из первых патентов в этом направлении был получен Невервудом³. По его предложению после запекания к торцу секции прижимается проволоочный вывод, нагретый до 250°C , т. е. выше температуры плавления пленки, причем вывод разрешается погрузить в глубь секции не более чем на 3 мм. Далее, чтобы повысить влагостойкость секции, ее торец оплавляется паяльником, нагретым также до 250°C . На торце образуется смесь частиц металла и дезориентированного полимера с удельным сопротивлением не более $2\text{ ом}\cdot\text{см}$; она создает

¹ Пат. США, кл. 317—260, № 3273034, 12.08.1966, Дж. Мак Грау.

² Пат. США, кл. 317—260, № 3256472, 14.06.1966, Д. Центурнон.

³ Пат. США, № 2785352, 12.03.1957, П. Невервуд.

хороший контактный слой, обеспечивающий надежное электрическое соединение вывода с обкладкой.

Различные варианты этой же идеи вплавления контактного вывода в торец секции описываются и в более поздних патентах¹.

Другая идея — это прокалывание отверстия в торце секции перпендикулярно ее оси в том участке, где расположены пленка и обкладка одного знака (рис. 13), с последующей запрессовкой выводного проводника в это отверстие.² Позже было введено изменение, а именно: предложено прокалывать отверстие самим выводным проводником, нагретым до температуры плавления пленки³. Это сближает данный патент с указанными выше, предусматривающими вдавливание нагретого проводника в торец секции.

Можно все же думать, что переходное сопротивление между проводником и обкладкой при описанных здесь способах контактирования будет выше, чем при обычном способе обжима выступающей обкладки, ее облуживания или шоопирования и припайки выводного проводника к полученному на торце проводящему слою. Поэтому этот «классический» способ следует сохранить для конденсаторов с диэлектриком из неполярных пленок, которые должны иметь малый угол потерь. В том же случае, когда используется полярная пленка и угол потерь конденсатора повышен, идея вплавления вывода в торец секции может быть, видимо, использована с успехом.

Секционирование пленочных конденсаторов. При изготовлении пленочных конденсаторов для работы при высоком или повышенном напряжении, когда возникает опасность развития ионизации в диэлектрике конденсатора, приходится принимать меры к устранению этой опасности, поскольку короностойкость пленочных синтетических диэлектриков невысока и обычно ниже, чем у пропитанной бумаги. Так же как и при бумажной изоляции, ионизирующее напряжение в пленочном диэлектрике относительно медленно возрастает с увеличением толщины

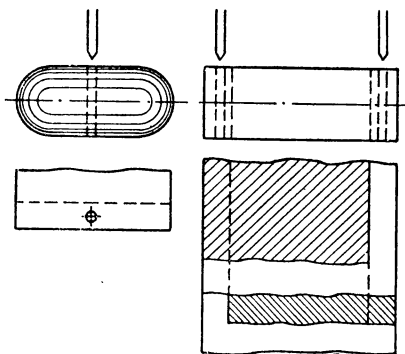


Рис. 13. Прокалывание отверстий у торцов пленочного плоскопрессованного конденсатора для вставления выводов

¹ Пат. США, кл. 317—260, № 3137364, 14.01.1964, Дж. Блэк, Ч. Рейбэрн; пат. США, кл. 317—260, № 3243675, 27.03.1966, Ч. Рейбэрн.

² Пат. США, кл. 29—25.42, № 3071842, 08.12.1963, Р. Хольда, Н. Уокер.

³ Пат. США, кл. 317—260, № 3134059, 19.05.1964, Ч. Рейбэрн.

диэлектрика, а напряженность начала ионизации заметно снижается.

Для повышения ионизирующей напряженности в диэлектрике многослойного намотанного конденсатора предлагается¹ разделить диэлектрик по толщине на две равные части, проложив между ними «плавающую» обкладку, не имеющую отдельного вывода. Размеры этой обкладки надо взять такими, чтобы она выступала за линию, соответствующую краям рабочих прокладок, т. е. чтобы края рабочих прокладок были перекрыты выступающими краями «плавающей» обкладки. При этом диэлектрик

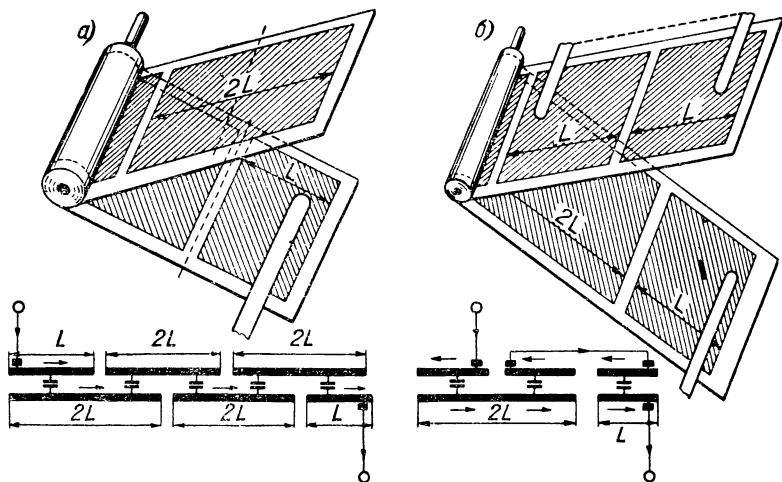


Рис. 14. Секционирование пленочных конденсаторов при последовательном включении секций

конденсатора разбивается на два слоя меньшей толщины, для которых ионизирующая напряженность соответственно повышается. По существу в этом случае конденсатор будет состоять из двух секций, соединенных последовательно, и ионизирующее напряжение такой системы будет заметно повышено по сравнению с несекционированным конденсатором. Очевидно, такой же эффект можно получить, если отдельно намотать две секции с половинной толщиной диэлектрика и удвоенной емкостью и соединить их последовательно, но при этом несколько возрастет объем конденсатора и повысится трудоемкость намотки.

При увеличении рабочего напряжения приходится увеличивать число соединяемых последовательно секций, причем схема намотки усложняется. На первый взгляд, при этом можно вести намотку, пока не получится нужное число последовательно соединенных секций, как показано на рис. 14, а. Однако такой спо-

¹ Англ. пат., кл. 37, (H01g), № 918695, 13.02.1963, Шен Тзу Ен.

соб секционирования неправилен, так как при этом резко возрастает индуктивность конденсатора, поскольку направления токов в обеих обкладках всех секций совпадают и их магнитные поля складываются.

Чтобы избежать этой опасности, надо применять такую схему секционирования, которая обеспечит разное направление токов в соседних обкладках и позволит резко снизить индуктивность конденсатора. Такая схема применительно к трехсекционному конденсатору показана на рис. 14, б.

Для того чтобы получить секционированный конденсатор с выступающими обкладками (это особо важно, например, при металлизированных обкладках), было предложено при намотке конденсатора использовать узкие ленты фольги (значительно более узкие, чем ленты диэлектрика)¹. При этом обкладки одного ряда (1) (см. рис. 15) должны быть расположены между обкладками второго ряда (2) так, чтобы зазор 3 между обкладками 2 приходился против средней части соответствующей обкладки 1, перекрывающей края двух соседних обкладок 2. Таким образом создаются отдельные секции конденсатора, емкости которых включены последовательно, что позволяет получить высокое рабочее напряжение и исключить развитие ионизации. Вместо фольги могут быть с успехом использованы металлизированные обкладки. Такой конденсатор имеет компактную конструкцию и отличается уменьшенными размерами и весом, что особенно ценно для применения в космической электронной аппаратуре.

Защита пленочных конденсаторов от действия влажности. Выше уже отмечалось, что синтетические пленки в отличие от бумаги имеют резко пониженную гигроскопичность. Величина гигроскопичности некоторых пленок при длительной выдержке в воде, по данным Винсента, показана в табл. 2.

Для сравнения можно указать, что равновесная влажность конденсаторной бумаги при ее хранении в обычных условиях может составлять около 6—10%.

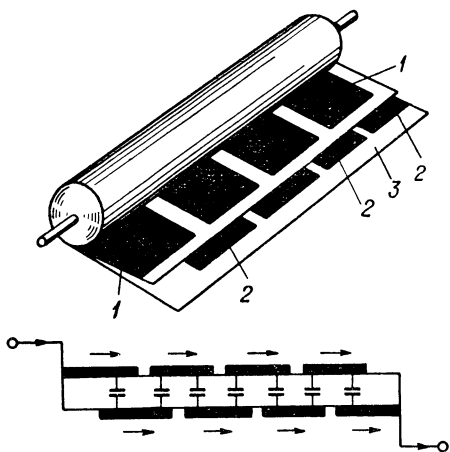


Рис. 15. Секционирование пленочного конденсатора по патенту Келлермана

¹ Пат. США, кл. 317—260, № 2292063, 13.12.1966, Д. Келлерман.

Данные табл. 2 показывают, что только пленки из эфиров целлюлозы отличаются несколько повышенной гигроскопичностью, а остальные синтетические пленочные диэлектрики обла- дают во много раз меньшей водопоглощаемостью по сравнению с конденсаторной бумагой. Как указывалось выше, пропитка

Таблица 2

Название материала	Гигроскопич- ность, %
Политетрафторэтилен	0,01
Полистирол	0,07
Полипропилен	0,3
Поликарбонат	0,3
Полиэтилентерефталат	0,6
Ацетобутират целлюлозы	2,0

бумаги не устраняет ее гигроскопичности, хотя и замедляет проникно- вение влаги в бумагу; поэтому проблема вла- гозащиты бумажных конденсаторов даже при их использо- вании в условиях нор- мальной влажности воз- духа является весьма важной.

В пленочных кон- денсаторах дело обстоит иначе. Во многих случаях может использоваться открытая конструкция без всякой дополнительной влагозащиты. В частности, такая конструкция широко приме-

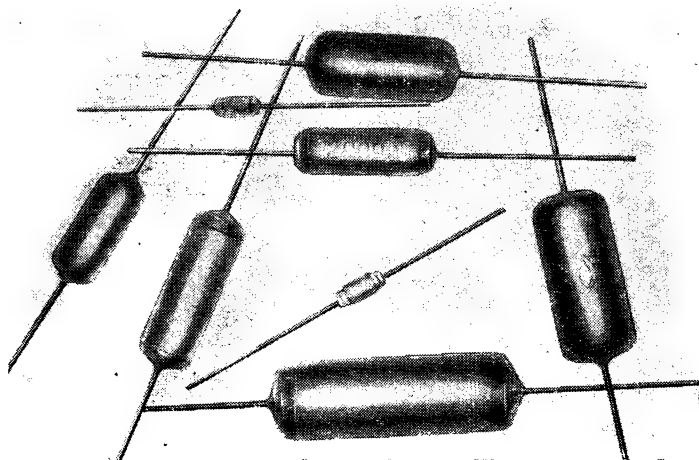


Рис. 16. Полистирольные конденсаторы открытой конструкции

няется при изготовлении полистирольных конденсаторов широ- кого применения (рис. 16).

Для того чтобы исключить снижение сопротивления изоляции конденсаторов открытой конструкции, которое может быть вы- звано осаждением влаги на их поверхности, было предложено обертывать секции слоем более толстой пленки того же типа

с шириной, большей ширины основной пленки, в связи с чем края этой защитной пленки выступали за края секции с обоих торцов. При запекании за счет усадки защитной пленки около проволочных выводов образовывалась изоляционная «юбка», затрудняющая образование сплошных пленок влаги на поверхности секции и резко улучшающая ее сопротивление изоляции в условиях высокой влажности.

Не все синтетические пленки, даже ориентированные, дают столь же совершенное остекловывание торцов, как полистирол, и тогда возможность проникновения влаги внутрь конденсаторной секции облегчается. Кроме того, даже при полном остекловывании торца секции сохраняется определенная влагопроницаемость материала на торцах и попадание влаги внутрь конденсатора не исключено. Несмотря на то, что количество поглощаемой влаги в пленочном диэлектрике невелико, все же оно может вызывать определенное ухудшение электрических свойств, хотя и не такое катастрофическое, как в бумаге. Кроме того, надо учесть, что часто при использовании пленочного конденсатора требования к его электрическим свойствам (стабильности емкости, величины угла потерь и постоянной времени или сопротивления изоляции) устанавливаются более жесткими, чем в производстве бумажных конденсаторов. Поэтому не во всех случаях, особенно при длительном действии высокой влажности, применима открытая конструкция пленочного конденсатора, и приходится прибегать к ее уплотнению влагозащитными материалами.

В связи с этим было сделано несколько предложений¹ по уплотнению конструкции пленочных конденсаторов с использованием полимеризующихся влагозащитных компаундов.

В особо тяжелых условиях работы, например при длительном воздействии тропической влажности, а также при повышенных требованиях к электрическим свойствам и их стабильности, при изготовлении пленочных конденсаторов приходится прибегать к полной герметизации их конструкции. При этом, как и в производстве бумажных конденсаторов, применяют металлические, паяные, сварные или выдавленные корпуса с припаянными или приваренными металлическими крышками, в которых герметически закреплены стеклянные или керамические проходные изоляторы; для конденсаторов цилиндрического типа применяют также корпуса в виде керамических или стеклянных трубок, закрывающихся с торцов металлическими крышками, герметично соединенными со стеклом или керамикой; выводы конденсатора присоединяются к этим крышкам.

¹ Пат. США, кл. 29—25.42, № 3071842, 8.12.1963, Р. Хольда, Н. Уокер; пат. США, кл. 29—25.42, № 3117364, 14.01.1964, Дж. Блэк, Ч. Рейбэрн; австр. пат., кл. 21g, 1, 12, (H01g), № 247990, 11.07.1966; японск. пат., кл. 59E102, 2, № 11534, 24.09.1965, Т. Мицуи; японск. пат., кл. 59E102, 2, № 11535; 09.06.1965, М. Мацуо, Х. Томикадзу.

При этом надо иметь в виду, что в случае использования пленок с высоким удельным сопротивлением, обеспечивающим высокое значение постоянной времени конденсаторов (на один-два порядка выше, чем у бумажных конденсаторов), утечка по поверхности стеклянного изолятора может превышать внутреннюю утечку конденсаторной секции, что вызовет снижение постоянной времени конденсатора. В этих случаях лучше применять не стеклянные, а керамические изоляторы, имеющие меньшую поверхностную утечку особенно в условиях высокой влажности.

Для многих синтетических пленочных материалов, в частности для полиолефинов (полиэтилен, полипропилен), представляющих собой чисто углеводородные соединения, герметизация конденсаторов нужна не только для защиты пленки от действия влажности, но в условиях работы при повышенных температурах также и для исключения контакта с воздухом (кислородом). Это связано с тем, что подобные материалы при повышенных температурах заметно окисляются, что отрицательно сказывается на их электрических свойствах. Герметизация конструкции позволяет в этом случае повысить верхний предел допускаемой рабочей температуры конденсатора.

§ 4. Классификация пленочных конденсаторов

В настоящее время производство конденсаторов с пленочным органическим синтетическим диэлектриком достигло уже такой степени развития, при которой оказывается необходимым ввести определенную систему классификации при рассмотрении этих конденсаторов.

Прежде всего рассматриваемые конденсаторы можно различать по типу диэлектрика на две большие группы: с диэлектриком из неполярных синтетических пленок и с диэлектриком из полярных пленок. В пределах каждой группы можно также рассматривать конденсаторы с фольговыми обкладками и металлизированные конденсаторы, иначе называемые металлопленочными. Однако вид обкладки в этом случае много меньше сказывается на свойствах или применении конденсатора, чем тип использованного диэлектрика.

Как известно, неполярные диэлектрики отличаются небольшой ϵ (примерно 2—2,5), т. е. меньше, чем для пропитанной бумаги, но вместе с тем имеют угол потерь $\operatorname{tg} \delta$, равный $2—5 \cdot 10^{-4}$, т. е. много меньше, чем у бумаги. До последнего времени пленки из этих материалов изготовлялись лишь с относительно большими толщинами, около 10—20 мкм и выше, т. е. толще, чем конденсаторная бумага. Большая толщина и малая диэлектрическая проницаемость вызывали резкое повышение удельных объемов конденсаторов с диэлектриком из неполярных пленок по сравнению с бумажными, и развитие их производства шло

в направлении создания новых типов намотанных конденсаторов, которые должны были заменять бумажные конденсаторы при повышенных требованиях к электрическим свойствам.

Прежде всего конденсаторы такого типа из-за своих малых потерь оказались пригодными для работы при высоких частотах наравне с высокочастотными слюдяными и керамическими конденсаторами. Надо, однако, при этом иметь в виду, что, хотя угол потерь неполярных синтетических пленок не зависит от частоты, угол потерь изготовленных из них конденсаторов растет с частотой за счет потерь в обкладках, которые тем сильнее будут сказываться, чем больше емкость конденсатора (рис. 26 и 36, г). Очевидно, это определяет наличие некоторых предельных частот, до которых такие конденсаторы могут применяться при еще умеренной величине потерь. При емкостях порядка $0,001 \text{ мкф}$ и ниже заметный рост потерь в таких конденсаторах начинается при частотах порядка одного или нескольких мегагерц, но при емкостях $0,1\text{—}1 \text{ мкф}$ потери начинают заметно увеличиваться с ростом частоты уже в области звуковых частот ($1\text{—}10 \text{ кгц}$).

Точно так же, хотя ϵ этих пленок не зависит от частоты, в области высоких частот для конденсаторов может наблюдаться как снижение емкости, вызванное влиянием сопротивления обкладок, так и увеличение емкости, вызванное влиянием индуктивности конденсатора или его выводных проводников. Эти изменения обычно происходят в области радиочастот, но при больших емкостях могут сделаться заметными и при звуковых частотах. В первом приближении эти изменения емкости с частотой могут быть представлены упрощенными формулами:

$$C_d = \frac{C}{1 + \omega^2 C^2 r^2} \quad \text{и} \quad C_d = \frac{C}{1 - \omega^2 LC}, \quad (9)$$

где C_d — действующая емкость конденсатора, ϕ ; r — активное сопротивление обкладок и выводов конденсатора, ом ; L — индуктивность конденсатора, гн ; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота (f — частота, гц); C — истинная емкость конденсатора, ϕ (измеренная при низкой частоте).

Снизить влияние сопротивления обкладок можно путем перехода от намотки со скрытой обкладкой к намотке с выступающей обкладкой [см. формулу (8)]. При тонкой металлизированной обкладке использование принципа выступающей обкладки позволяет также сильно ослабить влияние увеличения удельного сопротивления тонкого слоя, рассчитанного на единицу поверхности, по сравнению с сопротивлением значительно более толстой фольги. Однако даже при намотке с выступающей обкладкой влияние сопротивления металлизированных обкладок на угол потерь и емкость конденсатора будет уже сказываться при меньших частотах, чем в конденсаторе с выступающими обкладками из фольги.

Несмотря на указанные здесь соображения, частотный диапазон пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком резко расширен по сравнению с бумажными конденсаторами, и при небольших емкостях такие конденсаторы по величине потерь могут конкурировать со слюдяными конденсаторами и в ряде случаев использоваться в качестве заменителей последних.

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости у неполярных пленочных диэлектриков заведомо отрицательный и в основном определяет знак и величину ТКЕ конденсаторов с такими диэлектриками. По величине ТКЕ (примерно $-100 \div -200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$) конденсаторы с неполярным пленочным диэлектриком уступают лучшим слюдяным ($\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$) и керамическим термостабильным конденсаторам; однако у обычной конденсаторной керамики ТКЕ выше. По стабильности емкости во времени конденсаторы из неполярных пленок хуже слюдяных или высокочастотных керамических, так как коэффициент расширения органических веществ примерно на порядок выше, чем у таких неорганических веществ, как керамика или слюда. Поэтому неизбежные колебания температуры вызывают при хранении конденсаторов значительно большие колебания размеров и их остаточные изменения, усиливаемые пластичностью полимерных органических материалов. Кроме того, если обычно стабильность емкости у хороших слюдяных и керамических конденсаторов характеризуется сотыми долями процента, то у конденсаторов с неполярным пленочным диэлектриком эта величина измеряется десятками долями процента (полезно отметить, что для бумажных конденсаторов емкость может меняться во времени на несколько процентов).

Вместе с тем величина ТКЕ и стабильность емкости, которые могут быть получены при правильной конструкции и технологии пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком, во многих случаях удовлетворяют требованиям современной электроизмерительной техники и такие конденсаторы даже используют в качестве образцовых, обычно когда нужны емкости около десятков или сотен микрофард, но иногда и при меньших емкостях.

Высокое удельное сопротивление неполярных синтетических пленок, к тому же относительно мало зависящее от влажности, в связи с их малой гигроскопичностью позволяет изготавливать конденсаторы из таких пленок с очень высокой постоянной времени (до 10^6 сек), что ранее было недостижимо при использовании бумаги, слюды и других обычных диэлектриков. Подобные конденсаторы нашли себе применение при изготовлении дозиметров, в счетно-решающей технике и т. д. Такие конденсаторы отличаются также весьма малым коэффициентом абсорбции (примерно 0,01—0,1%), резко сниженным по сравнению с бумажными и слюдяными конденсаторами, что также важно при

использовании конденсаторов в ряде новых отраслей техники.

Таким образом, конденсаторы с неполярными пленками явились совершенно новым типом намотанных конденсаторов, более дорогим, чем бумажные конденсаторы, и с резко увеличенным объемом, но вместе с тем обладающим резко улучшенными электрическими свойствами.

Эти конденсаторы до последнего времени не заменяли бумажных конденсаторов, а скорее выступали в ряде случаев как заменители слюдяных высокочастотных конденсаторов в электронике или слюдяных стабильных конденсаторов в электроизмерительной технике.

В последнее время появились неполярные пленки типа олефинов, которые по цене уже приближаются к бумаге и могут быть изготовлены в толщинах того же порядка, что и конденсаторная бумага. Такие пленки могут выступать заменителями бумаги в производстве некоторых типов конденсаторов, работающих при частоте 50 гц, обеспечивая снижение потерь в конденсаторе. Надо отметить, что полистирол уже нашел себе известное применение для силовых конденсаторов, рассчитанных на работу в области звуковых частот, где ранее применялись бумажные конденсаторы с водяным охлаждением; в этом случае повышенная стоимость полистирола окупалась возможностью упрощения и удешевления конструкции за счет отказа от применения водяного охлаждения.

С другой стороны, появление новых технологических приемов, например метода лакирования, полимеризации в газовой фазе и т. д., позволяет получать пленки неполярных полимеров значительно тоньше, чем конденсаторная бумага. Поэтому теперь при малых рабочих напряжениях, в принципе, можно изготовить конденсатор с неполярным диэлектриком с лучшими удельными характеристиками, чем у бумажных низковольтных конденсаторов. Однако технология таких конденсаторов резко отличается от обычной технологии намотанных конденсаторов, а потому их удобнее рассматривать в виде особой группы тонкопленочных конденсаторов с органическим диэлектриком.

Полярные пленки начали применяться в конденсаторном производстве как пленочный материал с повышенной диэлектрической проницаемостью, что давало им определенное преимущество по сравнению с неполярными пленками. Однако большинство полярных пленок имеет относительно невысокую величину ϵ (около 3—4), т. е. лежащую на нижнем уровне значений ϵ для пропитанной бумаги, составляющих от 3,5 до 7. Сравнительно недавно была показана возможность получения органических пленок с ϵ выше, чем у пропитанной бумаги (около 10—15), но подобные материалы обладают резко увеличенными потерями, резкой температурно-частотной зависимостью и низким удельным сопротивлением, что ограничивает возможность их применения в конденсаторостроении.

То обстоятельство, что у большинства полярных пленок несколько ниже, чем у бумаги, не препятствует в ряде случаев изготавливать из них конденсаторы с улучшенными удельными характеристиками по сравнению с бумажными, так как многие из этих пленок имеют улучшенную механическую и электрическую прочность по сравнению с пропитанной бумагой, что позволяет снизить толщину диэлектрика в конденсаторе, которая сильнее влияет на удельные характеристики, чем диэлектрическая проницаемость. В ряде случаев, несмотря на повышенную стоимость 1 кг пленки по сравнению с бумагой, конденсатор из пленки оказывается дешевле бумажного, так как расход материалов уменьшается, а конструкция упрощается, поскольку малая гигроскопичность пленки часто позволяет перейти от герметической конструкции к более дешевой уплотненной. Во многих случаях преимуществом полярных пленок по сравнению с бумагой является также их повышенная нагревостойкость (это преимущество имеют и некоторые неполярные пленки, например фторопласт-4).

По величине угла потерь, его частотной зависимости и по температурной зависимости емкости большинство полярных пленок не лучше бумаги, а иногда даже хуже (для этих пленок TK_ϵ в отличие от неполярных пленок имеет положительный знак, а по абсолютному значению обычно больше). Преимуществом конденсаторов из полярных пленок являются более высокая постоянная времени, чем у бумажных конденсаторов, хотя и не столь высокая, как у конденсаторов из неполярных пленок (обычно до 10^5 сек, тогда как у бумажных конденсаторов — до 10^4 сек), а также сниженное значение коэффициента абсорбции (порядка нескольких десятых процента), хотя и не столь низкое, как у конденсаторов из неполярных пленок.

Имея большие потери, полярные пленки применяются в основном для конденсаторов постоянного напряжения или для работы при импульсном режиме при ограниченной частоте следования импульсов. В этих областях они начинают теснить бумажные конденсаторы. Все же для обычного применения в цепях постоянного напряжения при умеренном температурном режиме конденсаторная бумага, в особенности в нашей стране, дает пока более приемлемые технико-экономические решения, однако в будущем можно ожидать постепенного расширения применения пленочной изоляции и для таких конденсаторов.

Так же как и в случае неполярных пленок, применяя специальную технологию, можно изготавливать тонкопленочные конденсаторы, используя для этой цели полярные полимеры. Такие конденсаторы удобнее рассматривать вместе с тонкопленочными конденсаторами из неполярных полимеров.

Новым направлением в использовании пленочных диэлектриков в конденсаторостроении является применение комбинированного бумажно-пленочного диэлектрика, имеющего ряд пре-

имущества как перед чисто бумажным, так и перед чисто пленочным диэлектриком. В таких конденсаторах в комбинации с бумагой находят себе применение и полярные, и неполярные пленки. Еще недавно конденсаторы с комбинированным диэлектриком имели применение только в электронной и импульсной технике, но теперь они появились и в электроэнергетике в виде нового типа силовых конденсаторов с уменьшенными потерями при частоте 50—60 *гц* и с улучшенными удельными характеристиками. Если еще недавно в этой области бумага занимала монопольное положение, то теперь комбинация бумаги с пленкой начинает заметно теснить чисто бумажный диэлектрик.

К числу конденсаторов с комбинированным диэлектриком можно отнести также конденсаторы с диэлектриком, составленным из двух различных синтетических пленок: полярной и неполярной, хотя подобные конденсаторы имеют не очень широкое распространение.

Таким образом, учитывая приведенные выше соображения, мы принимаем для дальнейшего изложения следующую схему классификации пленочных конденсаторов:

1. Обычные конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок с фольговыми и металлизированными обкладками.

2. Обычные конденсаторы с диэлектриком из полярных пленок с фольговыми и металлизированными обкладками.

3. Конденсаторы с комбинированным диэлектриком: а) из бумаги и полярной пленки; б) из бумаги и неполярной пленки; в) из полярной и неполярной пленок.

4. Тонкопленочные конденсаторы из органических полярных и неполярных пленок.

Глава вторая

КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ НЕПОЛЯРНЫХ ПЛЕНОК

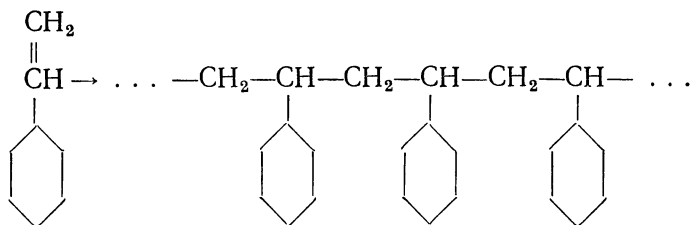
А. КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ ПОЛИСТИРОЛЬНОЙ ПЛЕНКИ И ИЗ СОПОЛИМЕРОВ СТИРОЛА

§ 5. Полистирольная пленка «стирофлекс»

Стирол $C_6H_5CH=CH_2$, иначе называемый винилбензол или фенилэтилен, представляет собой бесцветную жидкость со слабым запахом. Он имеет следующие физические свойства: температура кипения при давлении 760 *торр* равна 145,2° С, температура замерзания —30,6° С; при 20° С коэффициент преломления равен 1,5469, плотность равна 0,9060. Стирол нерастворим в воде, но растворяется в некоторых органических растворителях: бензине, четыреххлористом углероде и др. Стирол может быть получен различными методами, но в промышленных условиях

его обычно производят из этилбензола $C_6H_5CH_2CH_3$, синтезируя последний из бензола и этилена.

Жидкий стирол-мономер находит себе известное применение в конденсаторостроении в качестве пропиточной массы для бумажных конденсаторов, изготавливаемых некоторыми зарубежными фирмами; однако основное применение имеет твердый продукт — полистирол, получаемый из исходного мономера путем его полимеризации при нагревании в присутствии инициаторов (обычно перекись бензоила); в процессе полимеризации происходит соединение молекул стирола по местам разрыва двойных связей и образуется длинная цепочечная молекула полистирола:



Длина получаемых молекул, характеризуемая величиной молекулярного веса продукта полимеризации, зависит от температуры, при которой ведется этот процесс, и снижается при увеличении этой температуры. Средняя длина молекул зависит также и от чистоты продукта, так как при наличии примесей их атомы могут присоединяться по месту свободных связей на концах молекулы полистирола и прекращать нарастание ее длины, обрывая полимеризацию. С ростом молекулярного веса увеличивается нагревостойкость полистирола, которую можно характеризовать температурой размягчения. Обычное значение, получаемое по методу Мартенса, составляло ранее 70—80° С; теперь оно несколько повышено. Снижение температуры размягчения может происходить при наличии в материале остатков мономера.

Для получения из полистирола гибкой тонкой пленки применяется метод выдавливания нагретого полистирола через щель с последующим вытягиванием ленты после выхода ее из мундштука. Вытяжку ведут одновременно в продольном и поперечном направлениях, стремясь получить равномерное увеличение прочности в обоих этих направлениях.

Нижний предел толщины полистирольной пленки за рубежом равен 6—8 *мкм*, в СССР несколько выше; верхний предел — 100—200 *мкм*. В конденсаторостроении редко применяют пленку толще 40—50 *мкм*, обычно она используется для наружной защиты конденсаторной секции и не служит диэлектриком конденсатора. Плотность пленки $1,04 \div 1,05 \text{ г/см}^3$; временное сопротивление разрыву лежит обычно в пределах 800—900 кг/см^2 , и удлинение при разрыве 2,8—3,2%.

Диэлектрическая проницаемость и угол потерь полистирольной пленки, как и других неполярных полимеров, практически не зависят от частоты: для диапазона от 50 гц до 1 Мгц $\epsilon = (2,5 \div 2,6)$ и $\operatorname{tg} \delta = (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$. Удельное объемное сопротивление пленки весьма высоко: до $10^{19} - 10^{20} \text{ ом} \cdot \text{см}$ (все эти цифры относятся к комнатной температуре). Гигроскопичность полистирола при выдержке образца при относительной влажности 98% в течение нескольких сотен часов характеризуется прибавкой в весе около 0,07—0,13%. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты для высушенного образца полистирола (1) и для образца с со-

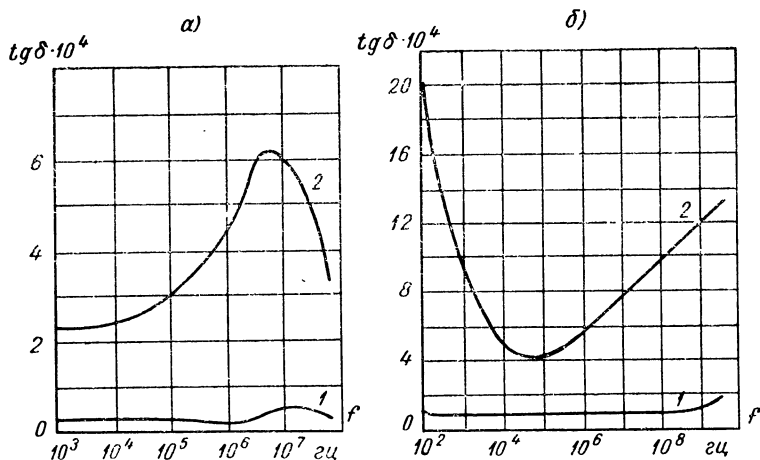


Рис. 17. Частотная зависимость угла потерь для полистирола

держанием влаги 0,13% (2) показана на рис. 17, а; такое увлажнение может заметно повлиять на электрические свойства. Частотная зависимость угла потерь полистирола может быть также вызвана его частичным окислением (рис. 17, б): 1 — образец получен в вакууме, а 2 — на воздухе (окислен).

Электрическая прочность полистирольной пленки при ее испытании электродами с небольшой площадью оказывается весьма высокой, порядка нескольких сотен киловольт на 1 мм, т. е. близка к значениям электрической прочности при чисто электрическом пробое («внутренняя» электрическая прочность). Кривые разброса пробивных напряжений для пленки трех толщин при испытании в один и в два слоя с электродом диаметром 10 мм показаны в левой части рис. 18. В правой части этого же рисунка, вверху, показано влияние толщины пленки на кривые разброса пробивной напряженности при частоте 50 гц. Ниже приведены данные Катшера для зависимости наибольших значений кратковременной прочности при постоянном и переменном токе от толщины пленки и данные того же исследова-

теля о зависимости электрической прочности от времени выдержки под напряжением: сравнивается область разброса для диэлектрика 2×30 мкм с кривыми для максимальных значений для диэлектрика 6×30 мкм и для толстой пленки (150 мкм), взятой в один слой. Эти кривые получены при постоянном токе.

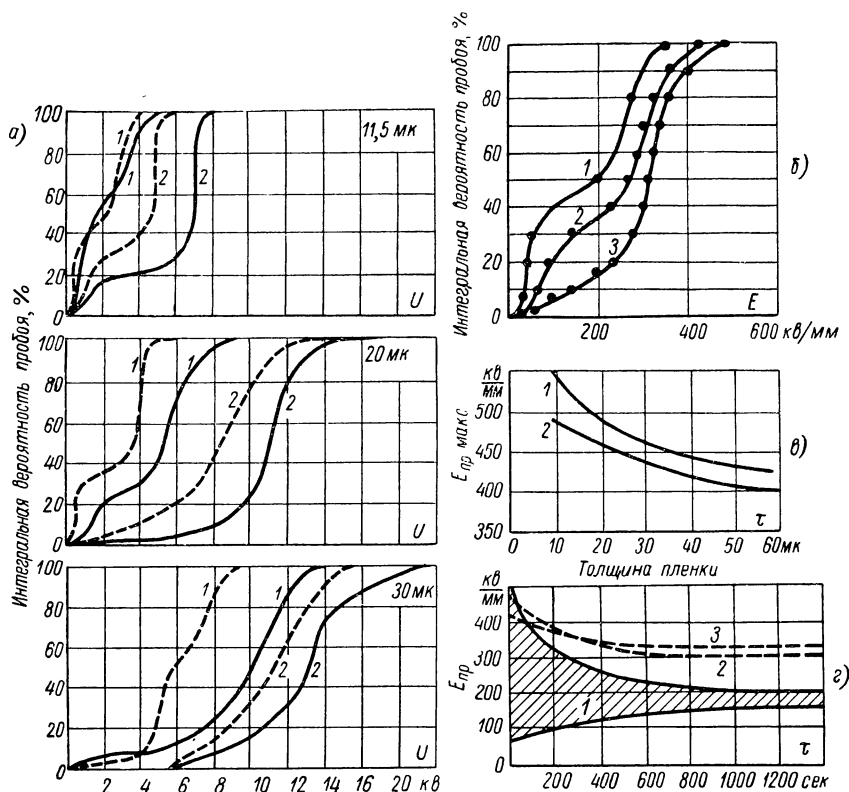


Рис. 18. Электрическая прочность полистирольной пленки: а — разброс пробивных напряжений пленок толщиной 11,5, 20 и 30 мкм (1 — один слой; 2 — два слоя; сплошные кривые — постоянный ток, пунктирные — 50 гц); б — разброс пробивной напряженности при испытании в один слой (постоянный ток) (1—11,5 мкм; 2—20 мкм; 3—30 мкм); в — зависимость $(E_{пр})_{макс}$ от толщины пленки (1—постоянный ток; 2—частота 50 гц); г — зависимость $E_{пр}$ (постоянный ток) от времени выдержки при разном числе слоев (1 — область разброса для образцов 2×30 мкм; 2 и 3 — максимальные значения: 2 — для 6×30 мкм и 3 — для 1×150 мкм)

Они показывают, что при увеличении времени действия напряжения пробивная напряженность для толстой пленки выше, чем для тонкой, хотя при кратковременном воздействии максимальное значение выше для тонкой пленки. Увеличение числа слоев улучшает длительную прочность, но даже при суммарной тол-

щине, превышающей толщину толстой пленки (например, 6×30 и 1×150 мкм), некоторое ее преимущество все же сохраняется.

Большой разброс значений электрической прочности полистирольной пленки особенно при малых значениях ее толщины следует объяснять наличием в ней слабых мест в виде сквозных пор или инородных включений.

Исследования Черча и Гартона показали, что причиной образования слабых мест в полистирольной пленке, приводящих к повышенному браку по пробое готовых конденсаторов, могут служить также частички перхоти, попавшие на ее поверхность.

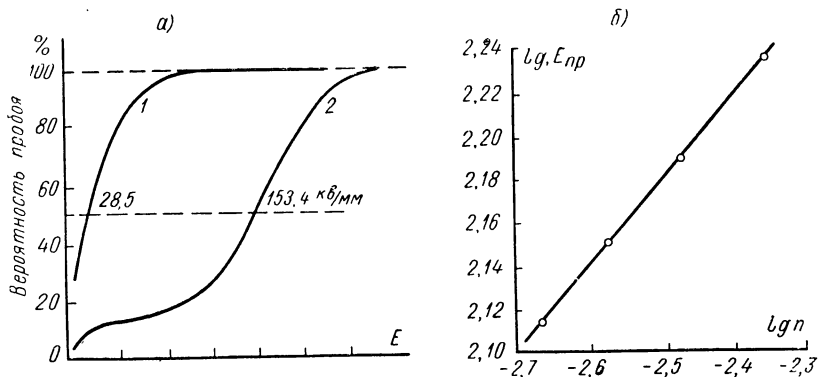


Рис. 19. Влияние степени ориентации на электрическую прочность полистирольной пленки

1 — неориентированная пленка; 2 — ориентированная

Опасное влияние этих частичек обусловлено содержанием в них жиров и масел из человеческого тела. Жиры действуют как растворитель, вызывая сначала локальную релаксацию молекулярной ориентации полистирола, а затем приводя к размягчению и разрыву пленки вокруг частицы. Такой же эффект может дать и попадание на пленку человеческого волоса. Могут быть опасными и отпечатки жирных человеческих пальцев на пленке. Вредное действие этих дефектов усиливается при нагреве, а потому они должны особенно заметно проявляться в процессе «запекания» секций.

Все перечисленные выше дефекты тем более опасны, чем меньше толщина пленки. В пленках малых толщин особенно велика вероятность появления сквозных пор. Поэтому существовало мнение о том, что нецелесообразно применять пленки полистирола даже толщиной 10 мкм, и основное применение находили пленки толщиной 20—30 мкм. Тем не менее за последние годы нижний предел толщины полистирольной пленки за рубежом снизился от 10 до 6 мкм. С одной стороны, это могло быть связано со снижением рабочих напряжений полистирольных конденсаторов (как и конденсаторов прочих типов) в связи

с широким внедрением в электронную технику полупроводниковых приборов; с другой стороны, это можно также объяснять улучшением технологии выработки полистирольной пленки. Как было показано П. Н. Щербаком и Г. Б. Шлаковской, в процессе ориентирования электрическая прочность полистирольной пленки резко возрастает (рис. 19, а), причем увеличение степени ориентации, характеризуемое возрастанием коэффициента двойного лучепреломления пленки (n), дает заметное улучшение электрической прочности (рис. 19, б). Можно полагать, что, подбирая режим вытяжки, зарубежным фирмам удалось получить приемлемые значения электрической прочности и для пленок пониженной толщины.

Ниже указаны значения характеристик полистирольной пленки, которые гарантируются в настоящее время фирмой «Норд Дейче Зекабельверке» (ФРГ).

Характеристики современной пленки «стирофлекс», выпускаемой в ФРГ для применения в конденсаторостроении:

Диэлектрическая проницаемость при частотах до 10 Мгц	2,4—2,6
Тангенс угла потерь при частотах до 10 Мгц	$2 \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление, ом·см	10^{18}
Температурный коэффициент, град ⁻¹	$-150 \cdot 10^{-6}$
Пробивная напряженность (50 гц), кв/мм	75
Удельное поверхностное сопротивление, ом	10^{13}
Удельный вес, г/см ³	1,05
Прочность на разрыв, кг/см ²	400
Удлинение при разрыве, %	2—13
Нагревостойкость по Вика, °С	$103 \pm 0,5$
Содержание мономера, %	0,2
Зольность, мг/кг	100
Коэффициент линейного расширения, град ⁻¹	$70 \cdot 10^{-6}$
» теплопроводности, ккал/м·ч·град	0,15
Влагопроницаемость, г/ч·см·торр	$3 \cdot 10^{-8}$
Гигроскопичность, вес. %	0,1

Средняя толщина пленки определяется по весу, ширине и длине образца пленки и по величине удельного веса стирофлекса; она должна отличаться от номинальной толщины, обозначенной на рулоне, не более чем на $\pm 10\%$. Пленка выпускается с номинальной толщиной: 6; 8; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30 и 40 мкм (для кабельной техники выпускаются пленки с толщиной от 50 до 150 мкм).

§ 6. Некоторые сведения о технологии и конструкции полистирольных конденсаторов

В настоящее время полистирол является наиболее подходящим материалом для изготовления стабильных конденсаторов с малым углом потерь, если от них не требуется особо высокой

нагревостойкости. Во многих случаях применяют полистирольные конденсаторы с резко суженным допуском по емкости, часто до $\pm 1\%$, а иногда даже до $\pm 0,1\%$, хотя наряду с этим выпускают и дешевые конденсаторы малой емкости, открытой конструкции, с допуском по емкости до $\pm 20\%$. При изготовлении конденсаторов повышенной точности встает проблема получения малого отклонения емкости от номинала. Для этой цели прежде всего нужно вести намотку с контролем емкости наматываемой секции, а потому станки должны быть снабжены соответствующим измерительным устройством.

При этом надо учесть, что для обеспечения повышенной стабильности емкости секции после намотки проходят процесс «запекания», при котором их емкость должна несколько увеличиваться. Приращение емкости при запекании зависит от многих факторов: режима запекания, натяжения при намотке, конструкции секции и т. п., а потому его можно учесть только приблизительно и соответственно снизить значение емкости, до которого ведется намотка, по сравнению с заданным номиналом. При этом, по-видимому, трудно получить отклонение емкости запеченной секции от заданного номинала менее чем на $\pm 2 \div 3\%$.

Если нужен более узкий допуск, то надо прибегнуть к какому-либо методу подгонки емкости. Простейший способ — это изготовление конденсатора из двух параллельно соединяемых секций, емкость которых в сумме равна заданному номинальному значению. При этом возможны два случая; емкость каждой секции берется примерно равной половине номинала или же одна секция имеет емкость, примерно равную номиналу, лишь немного ниже, а вторая секция имеет малую емкость и используется как довесок.

В первом случае проводится измерение емкости секций, выпущенных по обычной технологии; они разделяются на две группы — с минусовым и с плюсовым отклонением от половины номинала, а затем ведется их подбор парами из одной и из другой группы с таким расчетом, чтобы суммарная емкость пары соответствовала заданному номиналу в пределах заданного допуска. На этом принципе в Народной Республике Болгарии выпускают конденсаторы открытого типа под названием «Дуплекс» с допуском по емкости $\pm 1\%$, представляющий собой две параллельно соединенные цилиндрические секции с подобранными значениями емкости, обернутые пленкой полистирола повышенной толщины, которая плотно скрепляет секции при дополнительной операции запекания. Фирма «СЭЛ» (ФРГ) выпускает аналогичные конденсаторы под названием «Цвилингсвикель». Такие же конденсаторы изготавливает фирма «Фуисту» (Япония) с допуском по емкости до $\pm 0,5\%$.

Во втором случае измеряется емкость основной секции большой емкости и к ней подбирается секция малой емкости —

довесок, которая при параллельном подсоединении к основной секции обеспечит получение номинальной емкости с заданным допуском. При этом надо иметь большие наборы довесков с различными значениями емкости, из которых было бы легко подбирать нужные величины для добавки к емкости основных секций.

Если почему-либо неудобно изготавливать конденсатор из двух параллельно соединяемых секций, то иногда применяют конструкцию с подгоночными обкладками; в этом случае перед концом намотки одну из лент фольги обрывают и, продолжая намотку, вкладывают несколько изолированных друг от друга и от основной обкладки кусочков фольги разной ширины, служащих дополнительными обкладками; от каждой из этих обкладок осуществляется отдельный вывод. Тогда по отношению ко второй длинной ленте фольги мы имеем основную емкость, образованную первой длинной обкладкой (оборванной перед вкладыванием дополнительных обкладок), и ряд добавочных емкостей, величина которых определяется шириной дополнительных обкладок (в направлении длины основных лент). После запекания измеряется основная емкость и в случае необходимости для получения требуемого приближения к номиналу к ней присоединяется параллельно одна или больше подгоночных емкостей.

Представляют интерес способы изменения емкости в целях ее подгонки к номиналу уже после запекания полистирольных секций без использования дополнительных подгоночных обкладок, которые затрудняют намотку, снижая производительность. Было предложено¹ для подгонки емкости полистирольных конденсаторов наматывать их с таким расчетом, чтобы емкость была немного ниже номинала, а затем прессовать в разогретом виде с контролем емкости.

При расчете емкости полистирольных металлизированных конденсаторов можно принимать $\epsilon = 2,5$; при использовании обкладок из фольги для учета остаточных воздушных зазоров, неизбежных даже после запекания, величину ϵ следует снизить до 2,2.

Режим запекания полистирольных конденсаторов следует выбирать в соответствии с данными об усадке пленки при нагревании и об изменении емкости секций в процессе запекания. Существенная усадка полистирольной ориентированной пленки наблюдается при температурах, превышающих 80°C . Поэтому процесс запекания обычно ведут при температурах выше этого предельного значения, обычно при $90\text{--}95^{\circ}\text{C}$; иногда применяют даже 100°C при сокращенном времени выдержки секций в термостате. Подбор нужного времени выдержки производится экспериментально с учетом выбранного значения температуры, раз-

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 960913, 28.03.1957, В. Пранг.

мера запекаемых секций, а также объема и загрузки термостата.

Хорошие результаты можно получать, используя конвейерный принцип для процесса запекания: подвергаемые запеканию секции одна за другой с определенной скоростью продвигаются с помощью конвейерной ленты через трубчатый термостат с заданным распределением температуры по длине. При этом все секции проходят заведомо один и тот же режим запекания, если температура термостата и скорость конвейера регулируются с нужной степенью постоянства; это должно давать повышение однородности качества продукции.

Новые данные по сравнению результатов применения алюминиевой и оловянной фольги в производстве полистирольных конденсаторов приведены в работе Хюбнера (1968 г.). Он отмечает, что алюминиевая фольга дает вполне удовлетворительные результаты при использовании относительно толстых пленок полистирола (толщина порядка 25 мкм). При уменьшении толщины пленки меняются условия вытяжки и снижаются усадочные напряжения, которые возникают в пленке в процессе запекания. Остаточные напряжения в жесткой алюминиевой фольге оказываются больше усадочных напряжений тонкой пленки, и аксиальное давление, возникающее в намотанной секции при запекании, оказывается недостаточным для стабилизации ее формы, а следовательно, и величины ее емкости. Поэтому при намотке конденсаторов из тонкой пленки, например 10 мкм, следует применять мягкую оловянную фольгу. При испытании секций, намотанных с диэлектриком 2×10 мкм и обкладками 10 мкм, емкостью 50 пф, Хюбнер получил такие данные об изменении емкости после 20 циклов:

Пределы температуры, °С	20—70	20—80	20—85
Изменение емкости, %, для:			
алюминиевой фольги	+0,3	+1,95	—
оловянной фольги	—	0,0	—0,15

При изготовлении полистирольных конденсаторов за рубежом применялись две марки полистирольной пленки: с нормальной и с повышенной нагревостойкостью. Известно, что в 1960 г. итальянские фирмы импортировали из ФРГ пленки «Стирофлекс-3» и «Стирофлекс-6»: первую для конденсаторов с рабочей температурой до 60°С, а вторую — до 70°С. По-видимому, различие в нагревостойкости на 10°С было обусловлено только повышенной чистотой и более высоким молекулярным весом «Стирофлекса-6». В работе Боццини и Баварда, датированной 1962 г., указано, что для обычного сорта пленки *N* температура размягчения по Вика составляет 94°С, а для специального — *W* повышена до 103°С. Связь между усадкой пленки при ее прогреве в воде в течение 30 мин и температурой воды для сортов пленки *N* и *W* показана на рис. 20.

Еще в 1953 г. одна из английских фирм сообщила, что новый процесс изготовления пленки и конденсаторов позволил расширить температурный интервал их работы до $-40 \div +85^\circ\text{C}$; такие же пределы рабочей температуры были указаны в рекламном сообщении одной из французских фирм в 1958 г. со ссылкой на применение нового типа полистирольной пленки высокой степени чистоты. Американские фирмы также часто указывают пределы рабочей температуры для полистирольных конденсаторов от -55 до $+85^\circ\text{C}$. Надо полагать, что во всех этих случаях используется полистирольная пленка, изготовленная из полисти-

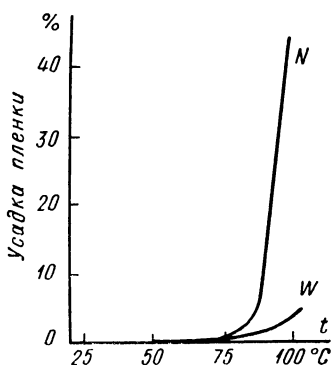


Рис. 20. Зависимость усадки полистирольной пленки марок *N* и *W* от температуры при ее прогреве в воде

рола высокой степени чистоты с высоким молекулярным весом. Однако можно думать, что температуру 85°C полистирольные конденсаторы могут выдерживать лишь при известном ухудшении их стабильности. Если требуется высокая стабильность емкости во времени и при воздействии циклов температуры, то даже для такой пленки с повышенной нагревостойкостью верхний предел работы конденсатора едва ли может превышать 70°C .

По-видимому, за рубежом в настоящее время стала применяться только пленка с повышенной нагревостойкостью типа «Стирофлекс-6» или «W». Во всяком случае, в последнем каталоге фирмы «Норд Дейче Зеэкабельверке» указывается лишь

один сорт пленки с нагревостойкостью по Вика, равной 103°C . Современная пленка отечественного изготовления также примерно соответствует зарубежной пленке повышенной нагревостойкости.

Согласно опыту фирмы «Норд Дейче Зеэкабельверке», изложенному в работе Хюбнера (1968 г.), рекомендуется следующий режим запекания и стабилизации емкости полистирольных конденсаторов:

- 1) предварительный нагрев: быстрое повышение температуры до $80\text{--}90^\circ\text{C}$ и выдержка при этой температуре 2 ч;
- 2) собственно запекание: повышение температуры до $103 \pm 1^\circ\text{C}$ и выдержка при этой температуре от 30 мин до 4 ч в зависимости от объема запекаемых секций;
- 3) медленное охлаждение до комнатной температуры со скоростью порядка $10\text{--}20^\circ\text{C}$ в час;
- 4) стабилизация емкости воздействием пяти температурных циклов ($20\text{--}80^\circ\text{C}$) с выдержкой при каждой крайней температуре по 2 ч.

Повышение температуры запекания даже при сокращенном времени выдержки при повышенной температуре может уже приводить к заметному снижению электрической прочности полистирольных конденсаторов. Так, при сравнении электрической прочности двух партий конденсаторов (а) запекание 30 мин при 104°С и б) запекание 10 мин при 115°С) были получены следующие данные: среднее значение пробивного напряжения для партии а — 3500 в (при разбросе от 2200 до 4500 в), а для партии б — 2800 в (при разбросе от 1500 до 3600 в).

Обеспечение повышенной электрической прочности полистирольных конденсаторов беспокоит многих изобретателей.¹

Для повышения напряжения начала ионизации, что особенно важно при использовании полистирольных конденсаторов при переменном напряжении повышенной величины, например в электротермических устройствах, можно проводить пропитку конденсаторов, хотя, как это уже отмечалось выше, при пропитке стабильность емкости и ряд других показателей качества пленочных конденсаторов может заметно ухудшиться. Благоприятное влияние пропитки маслом на зависимость угла потерь полистирольного конденсатора от напряжения (частота 50 гц) показана на рис. 21. Красуцкий получил следующие данные для зависимости ионизирующей напряженности от толщины диэлектрика для пропитанных маслом конденсаторов емкостью 150—1000 пф:

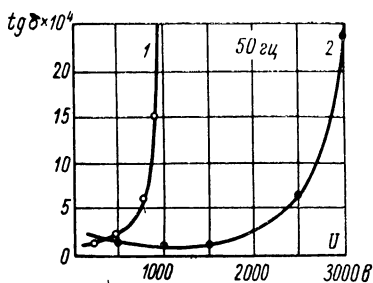


Рис. 21. Влияние пропитки маслом на зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ для незапеченного полистирольного конденсатора
1 — до пропитки; 2 — после пропитки

d , мкм	12,5	15	25	30	37,5	50	60
$E_{\text{ион}}$, кв/мм	195	175	125	110	100	85	80

Известно, что для повышения стойкости к воздействию электрического поля нефтяное масло должно содержать повышенное количество ароматических соединений. Однако, поскольку полистирол имеет ароматическую природу, можно полагать, что ароматические компоненты масла будут растворять его, разрушая пленку. Таким образом, для пропитки полистирола надо применять высокоочищенное нефтяное масло, практически не содержащее ароматики,² хотя стойкость такого масла к развитию

¹ Франц. пат., кл. H01g, № 1486441, 20.05.1967; пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1018163, 28.07.1966, Г. Фейт, Ф. Бейерлейн, К. Носс.

² Пат. ФРГ, кл. 21c, 2/31, (H01b); № 976658, 30.01.1964, Р. Тандлер, Г. Шульц.

ионизации и будет пониженной. Очевидно, что применение для пропитки полистирольных конденсаторов каких-либо полярных жидкостей нежелательно в связи с их увеличенными потерями, которые неизбежно вызовут заметное повышение потерь самого конденсатора; для обычных случаев применения полистирольных конденсаторов это недопустимо.

Гигроскопичность полистирола невелика, однако даже небольшие количества поглощенной влаги могут оказывать заметное влияние на электрические свойства полистирольной пленки (рис. 17, а) и изготовленных из нее конденсаторов. Следует учесть, что для полистирольной пленки коэффициент влагопроницаемости относительно велик, около $(0,6—3,0) \cdot 10^{-8} \text{ г/ч} \cdot \text{см} \cdot \text{торр}$, а коэффициент диффузии составляет $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{ч}$, что облегчает проникновение влаги в толщу полистирольной секции, не имеющей дополнительной влагозащиты. Поэтому незащищенные секции, даже прошедшие процесс запекания и имеющие «остеклованные» торцы, при высокой относительной влажности (98—100%) заметно снижают сопротивление изоляции и увеличивают угол потерь; изменение емкости при этом относительно невелико, но уже недопустимо для ряда типов конденсаторов с узким допуском по емкости. Надо при этом иметь в виду, что при возвращении увлажненного конденсатора в условия нормальной влажности восстановление электрических свойств происходит неполностью или требует достаточно большого времени.

Несмотря на это, основная масса полистирольных конденсаторов особенно при небольших емкостях, а также при допуске по емкости порядка 5% или выше, выпускается открытой конструкции (рис. 16) без всякой дополнительной влагозащиты, если не считать «остекловывания» торцов в процессе запекания. В условиях комнатной влажности такие конденсаторы достаточно стабильны, имеют малый угол потерь и высокое сопротивление изоляции; они могут удовлетворительно работать и при повышенной влажности (75—80%), но при длительном действии высокой влажности (90—100%), уже дают заметное ухудшение электрических свойств.

Поэтому наряду с открытой конструкцией выпускают также герметизированные полистирольные конденсаторы, которые подобны по своей конструкции бумажным герметизированным конденсаторам. Количество таких конденсаторов по сравнению с конденсаторами открытого типа относительно невелико и не все зарубежные фирмы их изготовляют. В основном герметизация полистирольных конденсаторов производится тогда, когда к точности их емкости и величине постоянной времени предъявляются повышенные требования (конденсаторы для высокочастотных фильтров аппаратуры проводной связи, для электроизмерительной аппаратуры, для счетно-решающей техники и т. д.).

Уплотнение конструкции полистирольных конденсаторов про-

изводится реже, так как все влагозащитные материалы имеют худшие значения удельного объемного сопротивления, чем полистирол, а потому уплотненный конденсатор трудно получить с такой же высокой постоянной времени, как чисто полистирольный конденсатор. Тем не менее, известен ряд случаев применения полистирольных конденсаторов уплотненной конструкции. Так, в работе Меллона (1968 г.) описана такая конструкция конденсатора фирмы «Вестерн Электрик» (США). Секции, намотанные из полистирольной пленки и оловянной фольги, помещаются в открытый с одного торца алюминиевый корпус, у которого внутренняя поверхность стенок изолирована порош-

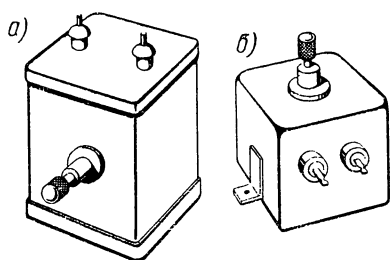


Рис. 22. Полистирольные подстроечные конденсаторы

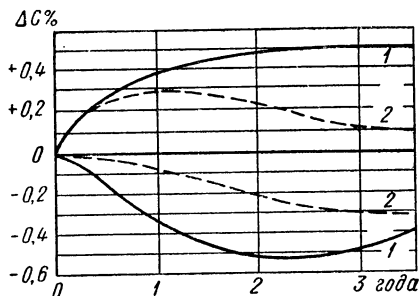


Рис. 23. Кривые максимальных и минимальных значений изменения емкости полистирольных конденсаторов при длительном хранении (по Гёблосу)

ком эпоксидной смолы путем горячего напыления; секции залиты в корпусе полиуретановым компаундом как для влагозащиты, так и для повышения устойчивости к вибрациям; дополнительная заливка открытого торца осуществляется жидкой эпоксидной смолой, которая далее отвердевает. Новая система тройной влагозащиты дает хорошую влагуустойчивость, однородность продукции и эстетичный внешний вид. Полиуретановый компаунд, используемый для внутренней заливки, представляет собой упругий гель. Конденсатор рассчитан на работу при 65°C ; для него гарантируется постоянная времени не ниже $10^5 \text{ ом} \cdot \text{ф}$.

В работе Гёблоса дано сравнение стабильности емкости во времени при длительном хранении полистирольных конденсаторов венгерского производства: открытой и герметизированной. На рис. 23 показаны кривые, изображающие минимальные и максимальные значения изменения емкости; различие в поведении конденсаторов открытой конструкции (кривые 1) и герметизированной (кривые 2) оказалось не очень большим, хотя и заметным: в первом случае разброс укладывается в пределы $\pm 0,5\%$, а во втором — в пределы $\pm 0,2 \div 0,3\%$. Если бы испытание

проводилось при высокой влажности окружающей среды, различие должно было бы быть более заметным. По данным венгерских исследователей Керпана и Тота, при влажности 98% и температуре 25—27°С установившееся приращение емкости незащищенных полистирольных конденсаторов достигается через 9—10 сут. и составляет от 0,5 до 1,4% (в среднем, около 1%). Эти данные были получены для небольших конденсаторов емкостью 1000 пф. Керпан и Тот считают, что для герметизированных конденсаторов изменения емкости с течением времени могут вызываться изменением относительной влажности внутри корпуса при колебаниях температуры окружающей среды, т. е. изменениями микроклимата внутри конденсатора.

В табл. 3 дано сравнение электрических свойств, которые гарантируются для полистирольных конденсаторов открытой и герметизированной конструкции, выпускаемых в ГДР. Особо выделена группа герметизированных конденсаторов большой емкости, предназначенная для применения в измерительной технике.

Таблица 3

Наименование характеристик	Открытые конденсаторы	Герметизированные конденсаторы	
		обычные	измерительные
Номинальное напряжение, в	25; 63; 160; 400; 630; 1000; 3000; 6300; 10 000	63; 250	160
Номинальная емкость, мкф	0,00001—0,01	0,0017—0,15	0,01—2
Допуск по емкости, %	± 5 ; 10; 20	$\pm 0,5$; 1; 2; 5	$\pm 0 \div -0,5$
Изменение емкости за год, %	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
Порядок величины ТКЕ, град ⁻¹	$-150 \cdot 10^{-6}$	$-150 \cdot 10^{-6}$	$-150 \cdot 10^{-6}$
Тангенс угла потерь, не более	$2 \div 3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Постоянная времени, сек, не менее	1000	5000	5000
Пределы рабочей температуры, °С	$-10 : +70$	$-40 \div +70$	$0 \div +50$

Данные табл. 3 показывают, что «измерительные» конденсаторы выделяются среди прочих герметизированных конденсаторов увеличенной номинальной емкостью, суженным допуском по емкости и уменьшенным интервалом рабочих температур. Для герметичных конденсаторов уменьшено гарантированное изменение емкости во времени по сравнению с конденсаторами открытого типа (эти данные табл. 3 хорошо согласуются с дан-

ными рис. 23), повышено значение постоянной времени и несколько повышено допускаемое значение угла потерь. Это, очевидно, отражает повышенные значения емкости герметизированных конденсаторов, что связано с возможностью повышения потерь за счет потерь в обкладках, которые чувствуются сильнее при увеличенной емкости.

В табл. 3 обращает на себя внимание резко расширенный диапазон номинальных напряжений конденсаторов открытого типа, а также малый нижний предел номинальностей емкости (10 нф).

Высокая стабильность емкости полистирольных конденсаторов и малый угол потерь, а также малый коэффициент абсорбции делают возможным использование этих конденсаторов при их тщательном изготовлении и надлежащей герметизации в качестве образцов емкости (эталонных конденсаторов). О применении образцовых полистирольных конденсаторов в США сообщалось еще в 1965 г., причем указывалось, что точность подгонки емкости к номиналу составляет несколько сотых процента. Как преимущество по отношению к слюдяным образцам емкости отмечается меньшая зависимость емкости от частоты в области низких частот: при переходе от постоянного тока к частоте 1 кГц слюдяной конденсатор меняет емкость на 3%, а полистирольный менее чем на 0,1%. Величина $\text{TKE} = -140 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По данным Гётца (ФРГ, 1966 г.), фирма «Редерштейн» ряд лет специализировалась на выпуске образцовых полистирольных конденсаторов на номинальные напряжения 25, 63 и 160 в; допуск по емкости $\pm 0,5$; 0,25 и 0,1%; $\text{TKE} = -(120 \pm 30) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для емкости 1 мкф и выше гарантируется постоянная времени не менее $5 \cdot 10^5 \text{ сек}$; при меньших емкостях — сопротивление изоляции не ниже 10^6 Мом . При длительном саморазряде (6 мес.) постоянная времени превышает 10^7 сек . Изменение емкости при переходе от постоянного тока к 1 кГц указано менее 0,1%. Величина k_a — также менее 0,1%.

Магазины емкости с полистирольными конденсаторами изготавливаются рядом зарубежных фирм: «Дженерал Рэдио» (США), «Телеграф Конденсер К⁰» (Англия) и др. Начальная емкость — около 40 нф, $C_{\text{мин}} = 0,001 \text{ мкф}$, $C_{\text{макс}}$ — от 1 до 100 мкф. Точность подгонки емкости — от $\pm 0,25$ до 1%, $\text{TKE} = 140 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\text{tg } \delta$ при 1 кГц — менее $4 \div 5 \cdot 10^{-4}$; k_a — менее 0,1%; рабочее напряжение 25 в при частотах до 10 кГц или до 350 в постоянного тока (при емкостях 1 мкф и ниже).

§ 7. Электрические свойства полистирольных конденсаторов

Точность и стабильность емкости. Применяя подгонку емкости, можно изготавливать полистирольные конденсаторы с узким допуском по емкости, но это связано с усложнением технологии

или конструкции конденсатора, а потому при массовом изготовлении менее ответственных конденсаторов открытого типа обычный допуск по емкости для полистирольных конденсаторов составляет ± 5 , ± 10 и даже $\pm 20\%$.

Конденсаторы герметизированного типа с более высокими значениями емкости и для специального применения изготавливают с более узкими значениями допуска; так, для отечественного типа МПГ при емкостях выше $0,01 \text{ мкф}$ составляет $\pm 1\%$. Согласно табл. 3 нижний предел допуска по емкости для герметизированных конденсаторов, выпускаемых в ГДР, составляет $\pm 0,5\%$, а для измерительных конденсаторов еще меньше: от 0 до $+0,5\%$. Конденсаторы МПГТ повышенной точности выпускаются у нас с допусками по емкости $\pm 0,5\%$ и $\pm 0,2\%$, а один из вариантов конденсаторов этого типа емкостью $0,5 \text{ мкф}$ даже с допуском $\pm 0,1\%$.

Французские фирмы указывают нижний предел допуска равный $\pm 0,5\%$ ($0,5 \text{ нф}$); японские фирмы до $\pm 0,3\%$ ($\pm 1 \text{ нф}$); итальянские — для обычных конденсаторов при емкостях до 200 нф нормальный минимальный допуск $\pm 5\%$ и при емкостях $200\text{—}1000 \text{ нф}$ $\pm 2\%$ (или $\pm 1 \text{ нф}$); специальный допуск при больших значениях емкости $\pm 0,5\%$. Применение полистирольной пленки для изготовления образцовых

конденсаторов и магазинов емкости целесообразно при больших значениях емкости, когда применение слюды приводит к большим значениям размеров и веса магазина и его высокой стоимости. Практически в измерительной технике очень редко применяют слюдяные конденсаторы емкостью выше 1 мкф , переходя при больших емкостях к использованию полистирольных конденсаторов. Они несколько уступают слюдяным по стабильности емкости во времени и по величине ТКЕ, но превосходят их по величине постоянной времени и имеют резко сниженный коэффициент абсорбции; по величине угла потерь они, примерно, равноценны.

Зависимость емкости полистирольных конденсаторов от температуры в каталогах зарубежных фирм часто изображается в виде прямой линии; в литературе можно найти и заметные отклонения от прямолинейности (рис. 24), иногда они связаны

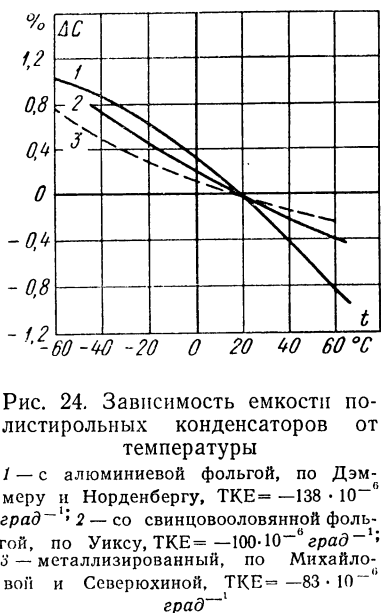


Рис. 24. Зависимость емкости полистирольных конденсаторов от температуры

1 — с алюминиевой фольгой, по Дэммеру и Норденбергу, $\text{ТКЕ} = -138 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; 2 — со свинцовооловянной фольгой, по Уиксу, $\text{ТКЕ} = -100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; 3 — металлизированный, по Михайловой и Северюжиной, $\text{ТКЕ} = -83 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$

с погрешностью измерения или с недостаточной стабилизацией емкости исследуемого конденсатора. По данным Хюбнера (ФРГ, 1968 г.), исследовавшего негерметизированные запеченные конденсаторы емкостью $50\,000\text{ нф}$ с диэлектриком $2 \times 25\text{ мкм}$ и алюминиевой фольгой 10 мкм , в условиях нулевой относительной влажности, в пределах измерения температуры от -40 до $+70^\circ\text{C}$ кривая $C=f(t)$ была строго прямолинейной и $\text{ТКЕ} = -125 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

При меняющейся влажности наблюдался гистерезис между прямым и обратным ходом кривой и для ТКЕ было получено значение $-(125 \pm 15) \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

При переходе к постоянной влажности 98% емкость увеличилась на 0,5%, но от этого увеличенного значения в пределах $20-70^\circ\text{C}$ изменение емкости носило прямолинейный характер, гистерезис отсутствовал и ТКЕ был равен $-125 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$. Для конденсаторов с более тонким диэлектриком: 2×10 или $1 \times 20\text{ мкм}$ Хюбнер получил $\text{ТКЕ} = -(120 \pm 12) \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

Отечественная норма на величину ТКЕ полистирольных конденсаторов составляет $-200 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$; фактически абсолютное значение ТКЕ всегда ниже этого предела.

По данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной, для металлизированных полистирольных конденсаторов (металлопленочных) при односторонней металлизации ТКЕ лежит в пределах от -30 до $-150 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, составляя в среднем $-75 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

Зарубежные фирмы часто указывают среднее значение ТКЕ полистирольных конденсаторов, не оговаривая определенной нормы; например, в ГДР указывают значение $-150 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ (табл. 3); такое же значение указывают многие фирмы западной Европы; в рекламах американских фирм чаще указывается значение $-100 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, возможно в тех случаях, когда применена свинцовооловянная, а не алюминиевая фольга. Японские фирмы дают значения $\text{ТКЕ} = -150 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, реже $\text{ТКЕ} = -130 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$. Иногда указываются допускаемые пределы отклонения от среднего значения; например, французская фирма «ЛТТ» для конденсатора из пленки с повышенной нагревостойкостью указывала значение $\text{ТКЕ} = -(100 \pm 50) \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$. Позже Парис и Пижонье привели значение $-(120 \pm 50) \cdot 10^{-6}$. В работе Лампье (США) указан обычный предел разброса ТКЕ от -70 до $-170 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, но отмечается, что в некоторых случаях требуются конденсаторы, имеющие $\text{ТКЕ} = -(120 \pm 10) \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$.

Расчет величины ТКЕ полистирольного конденсатора с учетом механических напряжений, возникающих в секции конденсатора при ее нагревании, и упругих деформаций, вызванных этими напряжениями, провел недавно Лаубер (§ 3); рассчитанная им зависимость ТКЕ от отношения наружного диаметра секции к внутреннему приведена выше на рис. 11. Расчетные

значения удовлетворительно согласуются с указанными здесь опытными значениями ТКЕ.

Анализ литературных данных по вопросу о стабильности полистирольных конденсаторов во времени позволяет прийти к выводу, что для правильно запеченных и хорошо герметизированных полистирольных конденсаторов при их хранении или работе в комнатных условиях средние изменения емкости не должны превышать 0,05—0,10%, причем стабилизация емкости должна наступать за 0,5—1 год. Для конденсаторов открытого типа даже в комнатных условиях особенно при малых значениях емкости изменения могут быть больше и составлять не-

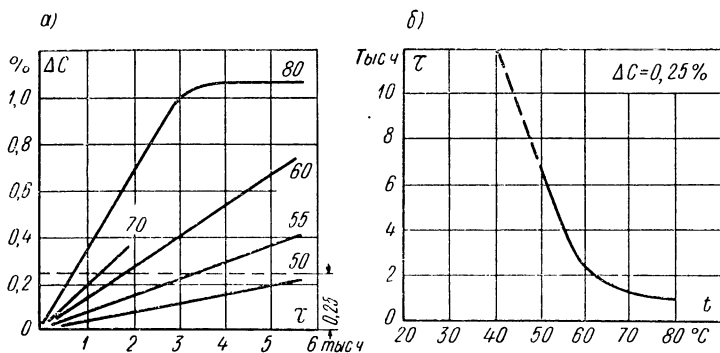


Рис. 25. Зависимость изменения емкости полистирольных конденсаторов от времени хранения при различных температурах (а) и зависимость времени, при котором емкость изменится на 0,25%, от температуры хранения (б) (по Хану и Вильке)

сколько десятых процента; при повышенной влажности и колебаниях температуры в пределах рабочего интервала колебания емкости для конденсаторов открытого типа могут достигать 1%, а в отдельных случаях даже больше особенно при малых емкостях; герметизированные конденсаторы в этих условиях, по-видимому, не должны изменять емкость более чем на 0,25—0,5%.

Повышение температуры при хранении полистирольных конденсаторов должно способствовать постепенному росту емкости во времени. Это подтвердилось в работе Хана и Вильке, наблюдавших за изменением емкости полистирольных конденсаторов при их длительном хранении при различных температурах без воздействия напряжения. Полученные в этой работе кривые зависимости среднего изменения емкости от времени хранения и допустимого времени хранения или работы от температуры (при среднем изменении емкости, не превышающем 0,25%) показаны на рис. 25. Согласно этим данным рабочая температура полистирольного конденсатора при длительной работе не должна превышать 60°С. Следует, впрочем, иметь в виду, что режим запекания не был оговорен и, возможно, не был оптималь-

ным; кроме того, не известно проводилась ли дополнительная стабилизация емкости после запекания воздействием нескольких температурных циклов.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость небольшой подстройки емкости полистирольного конденсатора уже после его монтажа в аппаратуре. Конденсаторы, позволяющие производить такую подстройку, выпускаются в США под названием «подстраиваемых» полистирольных конденсаторов. В них используются секции с выступающей фольгой особой намотки, обеспечивающей большую стабильность емкости при отсутствии внешнего давления. Изменяя давление на секцию с помощью нажимного винта, можно изменять ее емкость в пределах $\pm 1 \div 1,5\%$. В пределах до $\pm 0,25\%$ емкость меняется линейно с углом поворота винта. Применение намотки с выступающей фольгой обеспечивает снижение угла потерь и индуктивности конденсатора. Стабильность установленного значения емкости во времени, по рекламным данным, равна $0,03\%$. Точность подгонки емкости к номинальному значению, составлявшая ранее $\pm 0,1\%$, по данным рекламы 1961 г., доведена до $0,01\%$. Номинальные данные этих конденсаторов: у одной фирмы 200 в и $0,01\text{—}1 \text{ мкф}$, а у другой — $100 \div 400 \text{ в}$ и $1\text{—}10 \text{ мкф}$. Выпуск подобных конденсаторов, но с регулировкой емкости в пределах $\pm 10\%$ начат также в Англии (рис. 22, выше).

Величина угла потерь. Полистирольные конденсаторы имеют малый угол потерь, приближающийся по величине к тем значениям, которые можно получать для доброкачественных слюдяных или высокочастотных керамических конденсаторов. Отечественная норма на величину угла потерь герметизированных полистирольных конденсаторов $10 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и $15 \cdot 10^{-4}$ при 60°C (для слюдяных конденсаторов типов КСО и КСГ при емкостях выше 200 нф оговариваются такие же значения). Для некоторых типов полистирольных конденсаторов открытой конструкции норма увеличена до $15 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и до $20 \cdot 10^{-4}$ при $60\text{—}70^\circ$. Фактически величина $\text{tg } \delta$ лежит значительно ниже этих предельных величин и обычно составляет менее $5 \cdot 10^{-4}$ особенно при малых емкостях и не очень высоких частотах. В зарубежных рекламных данных часто указываются значения $\text{tg } \delta \approx 1 \div 2,5 \cdot 10^{-4}$, представляющие собой нижний предел, который можно получить только при особо благоприятных условиях. Парис и Пижонье указывают $\text{tg } \delta \leq 3 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 кгц .

Некоторые данные о зависимости угла потерь полистирольных конденсаторов от разных факторов приведены на рис. 26. Для незащищенного конденсатора может сказываться влияние влажности окружающего воздуха, как показано на рис. 26, а, по данным Уорнера; кривая снята при 20°C и частоте 1 кгц ; емкость конденсатора не указана. Судя по данным вышеприведенного рис. 17, а, при длительном действии влажности, близкой к 100% , угол потерь полистирола, а следовательно, и

полистирольного конденсатора может возрасти еще больше, чем показано на рис. 16, а; поэтому в производстве полистирольных конденсаторов для обеспечения малых значений $\operatorname{tg} \delta$ следует герметизировать конденсаторы, а перед герметизацией проводить их сушку, так как остаточная влага может вызвать заметное увеличение потерь.

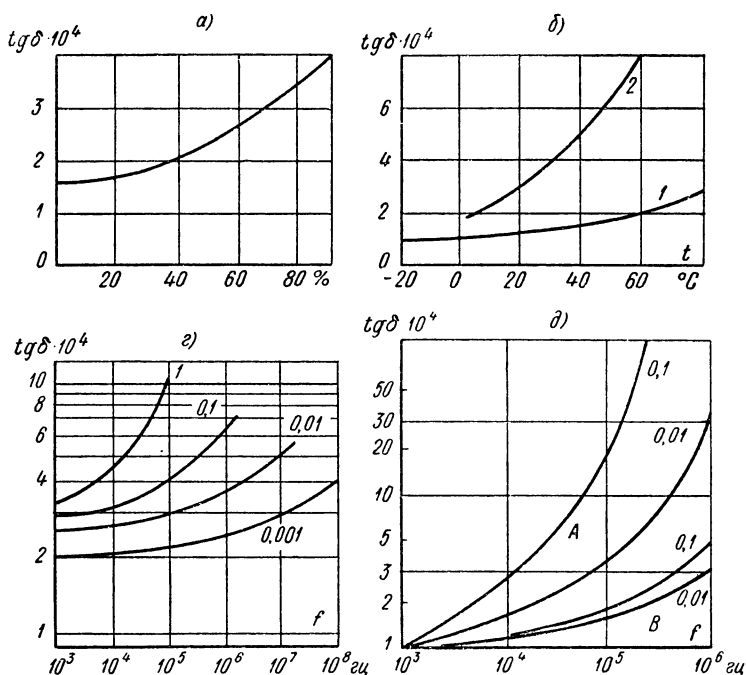


Рис. 26. Зависимость угла потерь полистирольных конденсаторов от разных факторов

На рис. 26, б показана зависимость угла потерь полистирольных конденсаторов от температуры; кривая 1 соответствует конденсатору с обкладками из фольги, а кривая 2 — металлизированному конденсатору (частота 1 кГц); замена фольги тонким слоем металла дала в данном случае заметное увеличение потерь и скорости их нарастания с увеличением температуры. Однако при частоте 1 кГц и верхнем пределе температуры 60°C величина угла потерь даже при металлизированных обкладках не так велика — ниже $10 \cdot 10^{-4}$.

Особенно сильно сказывается сопротивление обкладок на характере частотной зависимости угла потерь полистирольного конденсатора, причем возрастание угла потерь с частотой тем больше, чем больше емкость конденсатора (рис. 26, г); как от-

мечалось выше, при переходе от намотки со скрытой фольгой (*A*) к намотке с выступающей фольгой (*B*) сопротивление обкладки резко падает и частотная зависимость угла потерь заметно ослабляется (рис. 26, *д*) (цифры у кривых — емкость в *мкф*).

Составляющая угла потерь, обусловленная потерями в обкладках, определяется выражением:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C r, \quad (10)$$

где ω — угловая частота; C — емкость конденсатора, ϕ ; r — сопротивление обкладок, *ом*.

При намотке со скрытой фольгой при выводных контактах вставленных в середине намотки, сопротивление, эквивалентное потерям в обкладках, будет

$$r_1 = \frac{1}{6} \frac{L}{b d_{об}} \rho. \quad (11)$$

Здесь ρ — удельное сопротивление металла обкладки, *ом · см*; L — длина фольги, *см*; b — ширина фольги, *см*; $d_{об}$ — толщина обкладки, *см*.

При намотке с выступающей фольгой при той же активной ширине фольги b и закраине Δb сопротивление, эквивалентное потерям в обкладке, подсчитывается по формуле:

$$r_2 = 2 \frac{\Delta b + b/3}{L d_{об}} \rho. \quad (12)$$

Для конденсатора с металлизированными обкладками имеем

$$r_3 = 2 \frac{\Delta b + b/3}{L} r_0. \quad (13)$$

Здесь r_0 — сопротивление тонкого проводящего слоя на поверхности пленки, измеренное на участке, имеющем форму квадрата, *ом*.

В табл. 4 приведены расчетные значения составляющей $\operatorname{tg} \delta$, обусловленной потерями в обкладках, подсчитанные по указанным выше формулам при разных значениях частоты. При расчете взяты следующие данные: $C=0,01$ *мкф*; $b=20$ *мм*; $\Delta b=2,5$ *мм*; $L=450$ *мм* (эти цифры соответствуют толщине диэлектрика $2 \times 20=40$ *мкм*); $d_{об}=7$ *мкм*; $\rho=3 \cdot 10^{-6}$ *ом · см* (алюминий); $r_0=2$ *ом* (цинк).

Таблица 4

Конструкция конденсатора (тип обкладки)	Угловая частота			
	10^2	10^4	10^6	10^8
Скрытая фольга	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Выступающая фольга	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Металлизация	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^0$

Данные табл. 4 показывают, что потери в обкладках делаются соизмеримыми с потерями в диэлектрике ($\operatorname{tg} \delta \approx 1-2 \cdot 10^{-4}$) при частоте порядка 10^4 для случая металлизации, при частоте порядка 10^6 при намотке со скрытой фольгой и только при частоте порядка 10^8 при намотке с выступающей фольгой. Эти данные получены при емкости 0,01 мкф; при меньших значениях емкости частота, при которой делаются заметными потери в обкладках и начинается рост угла потерь конденсатора с частотой, будет соответственно повышена, а при больших значениях емкости соответственно понижена. Из таблицы можно наглядно заметить резкое возрастание потерь с частотой при металлизированных обкладках; это делает нежелательным применение металлизации для изготовления полистирольных конденсаторов, рассчитанных на работу в области высоких частот.

Приведенные здесь данные показывают, что значение $\operatorname{tg} \delta$ полистирольного конденсатора может меняться в широких пределах при изменении его номинальной емкости и частоты. Это было учтено в технических условиях фирмы «СЭЛ» (ФРГ), где указаны следующие значения $\operatorname{tg} \delta$:

Частота, кГц	1	10	100	1000
Пределы емкости, пф	1000—470 000	100—47 000	100—22 000	100—4700
	и выше			
$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$, не более . . .	2—5	2—5	2—5	5—10

Другие зарубежные фирмы в своих нормах на $\operatorname{tg} \delta$ также отражают в большей или меньшей степени влияние частоты и номинальной емкости. Верхний предел допускаемых значений $\operatorname{tg} \delta$ обычно не превышает $10 \cdot 10^{-4}$ (добротность не ниже 1000).

Сопротивление изоляции и постоянная времени. Высокое удельное сопротивление полистирола дает возможность изготавливать из него конденсаторы с исключительно высоким сопротивлением изоляции (высокой постоянной времени), необычным для конденсаторов иных типов; удается достигать значений порядка 10^6 ом·ф и даже выше. Это требует, однако, применения особо тщательной технологии, а потому в производстве обычных типов полистирольных конденсаторов, от которых столь высокое значение постоянной времени не требуется даже при использовании герметизации, наши нормы обычно гарантируют значение не менее 10 000 сек (то же, что $\operatorname{Мом} \cdot \text{мкф}$ или ом·ф). Следует отметить, что для лучших бумажных конденсаторов гарантируется норма 2000 сек.

Для полистирольных конденсаторов малой емкости указывается не постоянная времени, а сопротивление изоляции обычно не ниже 100 000 Мом (при емкостях ниже 0,1 мкф); для некоторых открытых типов — не ниже 10 000 Мом. Японская фирма «Родан» указывает для конденсаторов открытого типа сопротивление изоляции не ниже 45 000 Мом. Эти цифры соответствуют 20° С, а при верхнем пределе температуры 60—70° С

норма на сопротивление изоляции (или постоянную времени) обычно снижается в 2 раза. По нормам ГДР при 20° С гарантируется 5000 *сек* для герметизированных и 1000 *сек* для открытых конденсаторов.

В рекламах зарубежных фирм часто указываются более высокие значения: постоянная времени 10⁵—10⁶ *сек* и сопротивление изоляции 10⁶ *Мом*, но эти значения не являются, обычно, браковочными нормами. Впрочем, в каталоге фирмы «Дукати» (Италия) величина 10⁶ *Мом* указана как нижний допустимый предел при 20° С и влажности не выше 70% (измерение с выдержкой 1 *мин*).

Зависимость постоянной времени от температуры характеризуется кривыми на рис. 27, *а* и *б*. На первом из них кривые 1, 2 и 3 получены для конденсаторов с обкладками из фольги (1 — по данным Дзанобетти, 2 — по данным Козенса и 3 — по данным французской фирмы «ЛТТ»); кривая 4 — для металлизированного конденсатора (по данным Михайловой и Северюхиной). Фирма «СЭЛ» (ФРГ) приводит значения поправочного коэффициента k_{II} для пересчета значений сопротивления изоляции полистирольных конденсаторов, измеренных в пределах от 15 до 35° С, к температуре 20° С:

$t, ^\circ\text{C}$	15	20	23	25	30	35
k_{II}	0,8	1,0	1,2	1,3	1,6	2,0

На рис. 27 легко увидеть существенное понижение постоянной времени при переходе от фольговых обкладок к металлизированным. По данным Кишнера (1967 г.), для металлизированных полистирольных конденсаторов при 20° С дается значение: 0,4 — 1 · 10⁵ *сек*.

Судя по данным рис. 27, *а* зависимость $\lg RC = f(t)$ отклоняется от прямолинейной. В первом приближении ее можно заменить (для кривых 2 и 3) двумя прямыми: для более низких температур с коэффициентом наклона $\beta = 0,01 \div 0,015$ и для более высоких температур с $\beta = 0,025 \div 0,03$. Для кривой 1, которая меньше отклоняется от прямой линии, можно принять усредненное значение $\beta = 0,02$. Причину различия в наклоне кривой $\lg RC = f(t)$ в разных областях температуры можно объяснить, используя данные Мистича, показанные на рис. 27, *б*; кривые *A* получены им для незащищенных полистирольных секций, а кривые *B* — для таких же секций в корпусах из стекла пирекс. Для кривых *A* среднее значение $\beta = 0,03$, а для кривых *B* среднее значение $\beta = 0,01$, характерное для неорганических материалов. Можно полагать, что на рис. 27, *а* кривые 2 и 3 сняты для герметизированных конденсаторов (в стеклянных трубках или в металлических корпусах со стеклянными изоляторами); в этом случае в области более низких температур, когда удельное объемное сопротивление полистирола очень велико, сопротивление изоляции конденсатора определяется не внутренней

утечкой через полистирол, а внешней поверхностной утечкой по неорганической изоляции, входящей в систему герметизации. Это свойственно и другим пленочным конденсаторам, когда пленка имеет высокое $\rho_{об}$. Цифры у кривых на рис. 27, б обозначают величину напряжения (в вольтах), при котором производились измерения; переход от 90 к 1000 в дает заметное снижение постоянной времени около 2—3 раз.

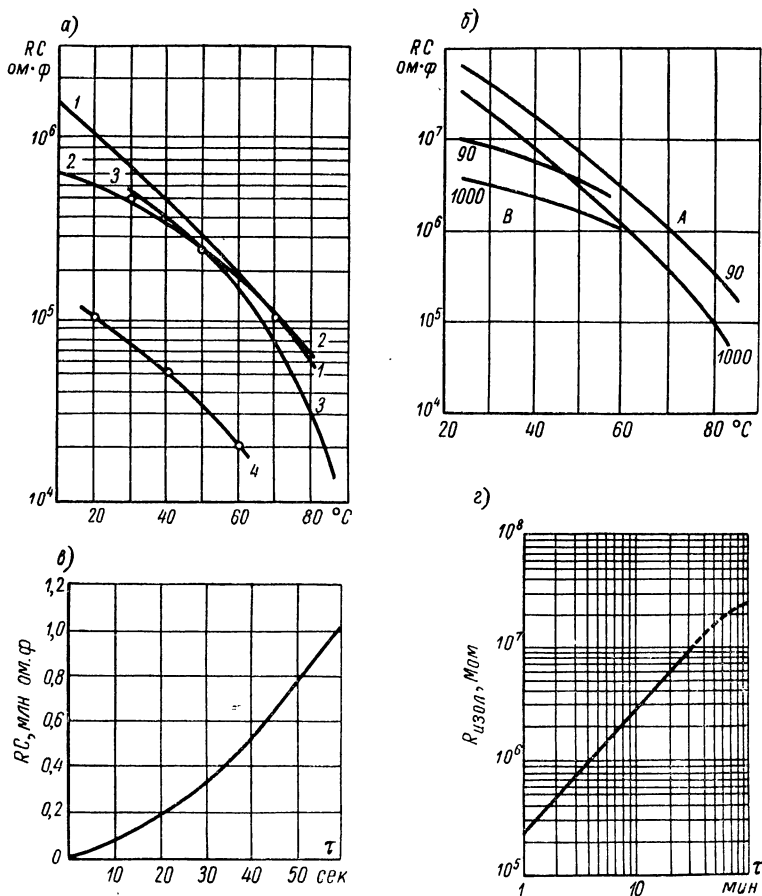


Рис. 27. Зависимость постоянной времени и сопротивления изоляции полистирольных конденсаторов от разных факторов

Влияние времени выдержки под напряжением на величину постоянной времени (и сопротивления изоляции) показано на рис. 27, в и г (соответственно, по данным Козенса и Карлтона). Резкое возрастание происходит в течение первой минуты приложения напряжения (рис. 27, в), но сопротивление изоляции продолжает нарастать и далее в течение десятков минут

(рис. 27, з); по данным Дзанобетти, сопротивление изоляции продолжает расти и при дальнейшем увеличении времени выдержки конденсаторов под напряжением; при переходе от 100 к 1000 мин он наблюдал возрастание $R_{из}$ на один порядок величин.

Малые значения тока утечки в полистирольных конденсаторах затрудняют измерения постоянной времени с помощью обычного зеркального гальванометра и других приборов, применяемых для регистрации тока, протекающего через диэлектрик. Поэтому часто прибегают к использованию метода саморазряда для определения постоянной времени конденсаторов этого типа. В этом случае вычисление постоянной времени (в секундах или омах на фараду) производят по формуле:

$$RC = \frac{\tau \lg e}{\lg U_0 - \lg U_1}, \quad (14)$$

где U_0 — напряжение на конденсаторе в момент начала саморазряда; U_1 — напряжение на конденсаторе по истечении времени τ сек.

Спадание напряжения на зажимах полистирольных конденсаторов происходит весьма медленно, как показал Козенс, проводивший испытания в течение нескольких лет. Значения постоянной времени в конце испытания составляли $1,5 \div 2 \cdot 10^9$ сек. Процесс спадания напряжения замедляется по истечении первого года испытания; это показывает, что возрастание сопротивления изоляции со временем протекает еще медленнее, чем можно было судить по данным рис. 27, з. Длительная выдержка полистирольного конденсатора под напряжением (конечно, не превышающем допустимого рабочего напряжения) должна приводить поэтому к резкому повышению его постоянной времени.

Полистирольные конденсаторы благодаря своей высокой постоянной времени явились первым типом конденсатора, который был использован в электрических дозиметрах, предназначенных для обнаружения и измерения радиоактивного излучения. В этом случае надо иметь возможность пренебрегать собственным саморазрядом конденсатора, т. е. иметь весьма высокую постоянную времени при небольших емкостях, примерно 300—500 пф.

Заметное увеличение электропроводности полистирольной пленки при воздействии облучения и относительно медленное возвращение к исходному состоянию создавали известные трудности при использовании полистирольных дозиметрических конденсаторов, что привело к отказу от использования полистирола для этой цели и замене его политетрафторэтиленом, который дал значительно лучшие результаты.

Коэффициент абсорбции. Как известно, коэффициентом абсорбции называют отношение напряжения U_v , восстановивше-

гося на зажимах конденсатора через время τ_3 с момента устранения кратковременного (на τ_2 сек) замыкания зажимов нако-
ротко, к зарядному напряжению U_3 , которое прикладывалось
к конденсатору до его замыкания накоротко в течение вре-
мени τ_1 :

$$k_a = \frac{U_b}{U_3} \cdot 100, \%. \quad (15)$$

Величина k_a сильно зависит от значений времени τ_1 , τ_2 и τ_3 , при которых он измерялся. При увеличении промежутка вре-
мени τ_2 (т. е. продолжительности короткого замыкания обкла-
док) величина k_a снижается, а при увеличении времени с мо-
мента устранения короткого замыкания до измерения величины
восстановившегося напряжения τ_3 величина k_a растет. Увели-
чение длительности зарядки τ_1 перед коротким замыканием
повышает k_a ; повышение температуры также дает некоторое
увеличение k_a . Повышение напряжения дает обычно некоторое
снижение k_a , поскольку величина U_b растет медленнее, чем
увеличивается зарядное напряжение U_3 , стремясь к некоторому
пределу.

Ранее величина k_a представляла интерес только для конден-
саторов высокого напряжения с точки зрения техники безопас-
ности, поскольку при высоких значениях k_a , характерных, на-
пример, для бумажных конденсаторов, и при большом зарядном
напряжении величина U_b , появляющаяся со временем на за-
жимах кратковременно разряженного конденсатора, могла
быть опасной для жизни обслуживающего персонала.

В настоящее время величина k_a представляет интерес при
использовании конденсаторов в измерительной и счетно-решаю-
щей технике при малых рабочих напряжениях, определяя собой
возможность появления непредусмотренных остаточных напря-
жений на конденсаторах, что нарушает правильную работу
схемы. Весьма малые значения k_a для полистирольных конден-
саторов, с которыми могут соперничать в этом отношении лишь
значительно более дорогие политетрафторэтиленовые (фторо-
пластовые), обеспечили широкое использование полистироль-
ных конденсаторов в таких случаях.

В связи с этим многие зарубежные фирмы начали указывать
в своих рекламных данных значения k_a для полистирольных
конденсаторов. Часто приводятся значения 0,05%, 0,02% и
даже 0,015%. Судя по приведенным выше данным, эти цифры
носят условный характер, поскольку величина k_a сильно зави-
сит от условий испытания. Столь низкие значения соответствуют
малым значениям времени зарядки и времени выдержки перед
измерением τ_1 и τ_3 , а также весьма кратковременному замыка-
нию накоротко.

При значительном увеличении времени зарядки коэффициент
абсорбции резко увеличивается, как показано на рис. 28 (по

данным Оганесяна), изображающем зависимость k_a от времени τ_3 при значении $\tau_2=5$ сек; сплошные кривые получены при времени зарядки 3 мин, а пунктирные — при 2880 мин (двое суток). Однако даже при таком длительном заряде величина k_a для полистирольного конденсатора не превосходила 0,1%, а для фторопластового конденсатора была еще ниже. Конденсатор из полярной пленки (полиэтилентерефталат) дал заметно увеличенные значения k_a , но все же много ниже, чем для бумажных конденсаторов, которые при длительном заряде могут иметь до 25—30%.

Сравнение значений k_a при кратковременном испытании ($\tau_1=1$ мин, $\tau_2=1$ сек и $\tau_3=30$ сек), по данным Мистича, дано ниже для конденсаторов из различных полярных и неполярных пленок (табл. 5). Тут же приводятся данные Хакера ($\tau_1=5$ мин; τ_2 и τ_3 — не указаны).

Все приведенные выше данные относятся к непроводящим конденсаторам. Как указано выше, пропитка резко увеличивает значения коэффициента абсорбции.

Электрическая прочность и допускаемая рабочая на- пряженность.

Электрическая прочность полистирольной пленки при чисто электрическом пробое («внутренняя прочность») весьма велика и, по данным Артбауера и Гриача, составляет 600 кВ/мм. Эта цифра соответствует полному устранению краевых разрядов и весьма кратковременному воздействию напряжения. При обычных условиях испытания с электродами небольшой площади (диаметр 10 мм) при быстром повышении постоянного напряжения до пробоя можно получать для пленки толщиной 10—30 мк, при испытании в один слой, значения

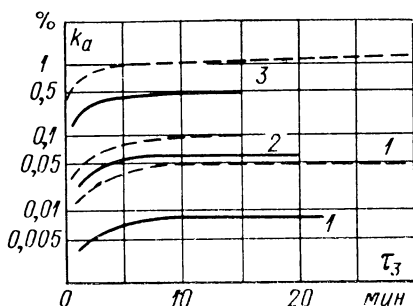


Рис. 28. Зависимость коэффициента абсорбции для конденсаторов из разных синтетических пленок от времени τ_3 после размыкания

1 — ПТФЭ; 2 — полистирол; 3 — ПЭТФ

Таблица 5

Диэлектрик конденсатора	$k_a, \%$	
	по Мистичу	по Хакеру
Полистирол	0,01—0,3	0,02
Политетрафторэтилен	0,01—0,02	—
Полиэтилен	0,02—0,04	—
Поликарбонат	—	0,05
Полиэтилентерефталат	0,2—0,5	0,10
Ацетат целлюлозы	2,0	—

пробивной напряженности около 200—300 кВ/мм при вероятности пробоя 50% (рис. 18, б).

Большой разброс значений кратковременной электрической прочности, характеризуемый кривыми на рис. 18, а и б, обусловлен наличием слабых мест, вероятность наличия которых под электродом резко возрастает с увеличением площади электрода. Поэтому переход от электрода диаметром 10 мм к площади обкладок 2000 см² в конденсаторной секции емкостью 0,1 мкф при

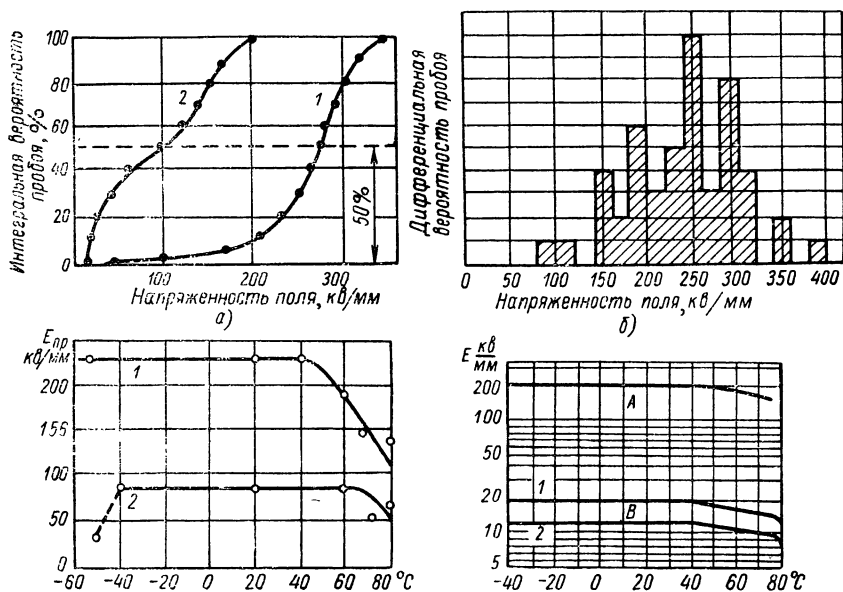


Рис. 29. Электрическая прочность полистирольных конденсаторов: а — разброс $E_{пр}$ для пленки (1) при электроде диаметром 10 мм и для конденсаторов (2) с обкладкой 2000 см²; б — разброс значений $E_{пр}$ (гистограмма) для конденсаторов с площадью обкладок 1400 см²; в — зависимость $E_{пр}$ для конденсаторов 0,1 мкф от температуры

1 — незапеченные; 2 — запеченные образцы;

г — сравнение температурной зависимости пробивной (А) и рабочей (В) напряженности от температуры

1 — трехслойные конденсаторы; 2 — двухслойные

толщине диэлектрика 2×20 мкм дает резкое увеличение количества пробоев при небольших значениях напряжения, как показали Е. И. Михайлова и Я. Я. Черняк. В данном случае даже при двух слоях пленки величина $E_{пр}$, соответствующая 50% вероятности пробоя, снизилась с 275 до 100 кВ/мм, причем резко возросла вероятность пробоя при напряженности ниже 50 кВ/мм. По данным Карлтона, при соблюдении условий высокой чистоты на производстве можно получать и при относительно больших площадях обкладок высокие значения $E_{пр}$, как показывает гистограмма на рис. 29; здесь среднее значение $E_{пр}$ составило

около 250 кв/мм при площади обкладок 1400 см² и суммарной толщине диэлектрика 25 мкм (вероятно, 2×12,5 мкм).

Столь высокое значение $E_{\text{пр}}$ обусловлено также тем, что эти данные получены для незапеченных или слабо запеченных секций. По данным А. П. Бутра, в результате запекания средние значения $E_{\text{пр}}$ могут снизиться более чем в два раза; эти данные получены для секций емкостью 0,1 мкф. Это снижение может быть вызвано следами жиров, которые дают быстрое местное разрушение пленки при повышенной температуре; может сказываться также сближение краев обкладок противоположного знака при продавливании размягченного полистирола жесткой фольгой; могут проявиться также механические напряжения в пленки при сокращении ее длины в процессе запекания, приводящие к ее местному разрыву, как было показано А. П. Бутра. Эта же причина, вероятно, приводит к снижению $E_{\text{пр}}$ при низких температурах у запеченных образцов. При температуре выше 40—60° С также наблюдается снижение электрической прочности полистирольных конденсаторов. Такие же данные были получены Дзанобетти (рис. 29, кривая А). Это явление было учтено фирмой «Икар» (Италия) при установлении зависимости допускаемой рабочей напряженности от температуры (кривые В на рис. 29); при 60° С рабочее напряжение снижается до 85% его значения при 40° С; а при 80° С — до 70%. В наших нормах рабочее напряжение сохраняется неизменным вплоть до верхнего предела допускаемой рабочей температуры (60—70° С).

По мнению С. Н. Койкова, старение полимерных пленок, в том числе и полистирола, при постоянном напряжении, как и при переменном, обусловлено ионизационными явлениями в остаточных газовых включениях, причем срок службы изоляции до ее пробоя τ и частота следования разрядов N экспоненциально зависят от температуры:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta W_{\tau}}{kT}}; \quad N = N_0 e^{\frac{\Delta W_N}{kT}}. \quad (16)$$

Здесь T — абсолютная температура.

Величины τ и N зависят также и от напряженности поля, но по степенному закону:

$$\tau = B_{\tau} E^{-m_{\tau}}; \quad N = B_N E^{m_N}. \quad (17)$$

Во всех случаях $m_{\tau} > m_N$; с повышением напряженности поля время жизни (срок службы) уменьшается более резко, чем растет частота следования разрядов. Объяснение этому явлению в работах С. Н. Койкова не дается.

Заметный эффект ионизационного старения полистирола и других пленочных диэлектриков при постоянном напряжении С. Н. Койков наблюдал только при повышенных температурах

и относительно высоких напряженностях поля. При комнатной температуре вплоть до пробоя он не мог установить наличия частичных разрядов, свидетельствующих о развитии ионизационного процесса старения. Тем не менее процесс старения, характеризующийся зависимостью между приложенным напряжением постоянного тока и сроком жизни полистирольных конденсаторов, можно наблюдать и при комнатной температуре, как показали исследования Е. И. Михайловой и Я. Я. Черняк. Эту зависимость можно представить эмпирическим уравнением:

$$U = 6300\tau^{-0,027}, \quad (18)$$

которое находится в соответствии с формулой (17), предложенной С. Н. Койковым. В формуле (18) U — пробивное напряжение, в, соответствующее 50% вероятности пробоя для испытываемой партии, а τ — время, сек. Данные получены для двухслойных конденсаторов с обкладками из фольги.

Медленность процесса старения при постоянном напряжении обусловлена тем, что ионизационные явления при этом виде напряжения при умеренной температуре должны проявляться очень слабо, так как малая проводимость диэлектрика резко уменьшает частоту следования импульсов частичных разрядов, ограничивая возможность стекания заряда, образованного на стенках включения при первом разряде. По той же причине весьма мала вероятность развития электрохимических процессов, обычно вызывающих старение диэлектриков при постоянном напряжении и зависящих от величины тока утечки, который в данном случае очень мал. Согласно формулам (16) при повышении температуры старение должно проявляться более заметно; по-видимому, это учтено итальянской практикой, снижающей рабочие напряжения полистирольных конденсаторов при температуре выше 40° С.

Следует учесть, что ионизационные явления, связанные с пробоем воздуха в остаточных воздушных включениях, не должны проявляться при напряжениях ниже минимального возможного пробивного напряжения воздуха (амплитудное значение 300 в). Вместе с тем полистирольные конденсаторы весьма часто имеют меньшие значения номинального напряжения: 250, 125, 63 и даже 25 в. Если наблюдаются случаи пробоя при таких значениях напряжения, то надо искать какой-то иной механизм пробоя, отличный от ионизационного.

Несмотря на медленность старения, в полистирольных конденсаторах берутся большие запасы электрической прочности, т. е. отношения $E_{пр}$ к $E_{раб}$. Значения $E_{ис}$ и $E_{раб}$ при разных емкостях и толщинах диэлектрика при обкладках из фольги указаны в табл. 6.

По отношению к среднему значению кратковременной пробивной напряженности (или к значению, соответствующему примерно 50% вероятности пробоя при кратковременном воз-

Номинальная емкость, мкф	Толщина диэлектрика, мкм	Постоянное напряжение, в		Напряженность поля, кв/мм	
		испытательное	рабочее	$E_{ис}$	$E_{раб}$
0,1 — 2	2×20	500	250	12,5	6,25
0,003—0,1	2×20	1000	500	25	12,5
0,003—0,05	3×20	2000	1000	26	13,3

действии напряжения) эти значения дают запас прочности не менее 10—20 раз. По отношению к нижнему пределу разброса электрической прочности, который не превышает обычно 50 кв/мм, запас по испытательной напряженности уже совсем невелик: при $E_{ис} = 25—26$ кв/мм отношение $E_{пр}$ к $E_{ис}$ всего около 2. При этом, взяв отношение $E_{ис}/E_{раб} = 2$, получаем указанные в таблице значения $E_{раб} = 12,5—13,3$ кв/мм. При большой площади обкладок при тех же толщинах диэлектрика вероятность пробоя при небольших значениях напряжения увеличивается, а потому при больших емкостях (верхняя строчка табл. 6) приходится дополнительно снижать $E_{раб}$.

По данным Девайде и Попкема, в миниатюрных полистирольных конденсаторах с емкостью до 0,03—0,08 мкф приняты следующие значения рабочей напряженности:

Рабочая напряженность, кв/мм	6,3	8,3	16,6
Толщина диэлектрика, мкм	10	15	30
Номинальное напряжение, в	63	125	500

Первые два столбца, очевидно, соответствуют однослойным конденсаторам, а последний — двухслойным (2×15 мкм), о чем можно судить по резко повышенному значению $E_{раб}$. Эти данные удовлетворительно согласуются с данными табл. 6. При таком осторожном подходе к выбору значений $E_{раб}$ надежность работы полистирольных конденсаторов оказывается достаточно высокой.

По данным Пачковского (ПНР), при испытании небольших полистирольных конденсаторов емкостью 47, 100 и 380 нф, при напряжении $0,8 U_{ном}$ и температуре $60 \pm 1^\circ \text{C}$, надежность их оказалась выше, чем керамических конденсаторов. После первых пробоев в самом начале испытания в дальнейшем за 2300 ч отказов не наблюдалось; среднее изменение емкости за время испытания составляло около 0,6%; максимальные изменения с достоверностью 0,997 не превышали +2,2 и —1%.

Упомянутые выше миниатюрные конденсаторы с диэлектриком 10—30 мкм Девайде и Попкема испытали на срок службы по нормам МЭК. Длительное испытание в течение 10 000 ч проводилось при напряжении $1,5 U_{ном}$ и температуре 85°C (для

конденсаторов с диэлектриком 10 мкм — при 70°С). Зависимость интенсивности отказов от времени полученная при этих испытаниях, показана на рис. 30, а. Кривая 1 получена для конденсаторов с диэлектриком 10 мкм (63 в) при ширине обкладки 15 мм и температуре 70°С; кривая 2 получена для конденсаторов с диэлектриком 15 и 30 мкм при 85°С и ширине обкладки 25 мм; кривая 3 — то же, но при обкладке 15 мм. Эти данные показывают, что увеличение ширины обкладки полистирольного конденсатора снижает его надежность. Проведенные ис-

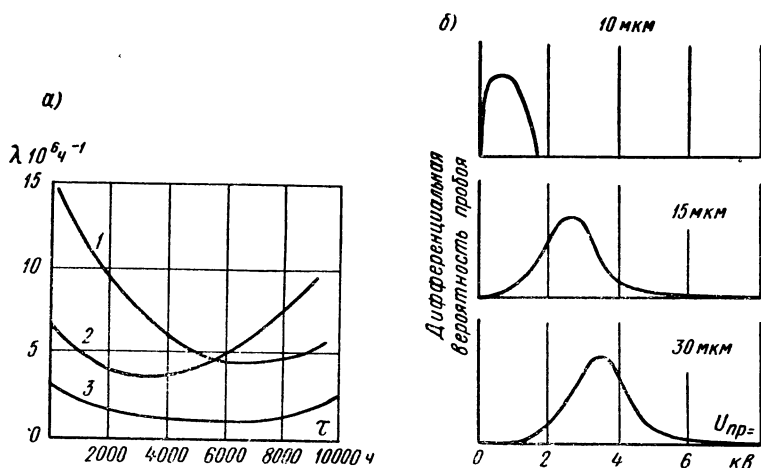


Рис. 30. Зависимость интенсивности отказов (а) от времени испытания полистирольных конденсаторов (1 — 10 мкм; 2 — 15 мкм; 3 — 30 мкм) и разброс кратковременных пробивных напряжений (б) для тех же конденсаторов (по Девайде и Попкема)

следования показали, что интенсивность отказов увеличивается пропорционально 5-й степени приложенного напряжения и удваивается на каждые 10°С повышения температуры.

Если принять эти данные для расчета, то получится, что при номинальном напряжении и температуре 65°С интенсивность отказов λ будет равна: $0,52 \cdot 10^{-6}$ и $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для конденсаторов 63 в с шириной обкладок соответственно 15 и 25 мм; $0,07 \cdot 10^{-6}$ и $0,27 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для конденсаторов 125 и 500 в с шириной обкладок соответственно 15 и 25 мм; по данным норм MIL-C-19978 на полистирольные конденсаторы, интенсивность отказов λ должна быть не выше $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, т. е. при температуре 65°С только конденсаторы с диэлектриком 10 мкм и шириной обкладки 25 мм не укладываются в эту норму. Для облегченных условий работы (0,5 $U_{\text{ном}}$ и 50°С) пересчет дает значения $\lambda \approx 6 \div 30 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ для конденсаторов 63 в и $1 \div 3 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ для конденсаторов 125—500 в; последние удовлетворяют норме фирмы «Белл Лаборатори» для счетно-решающих

устройств: $\lambda \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$. Пониженная надежность конденсаторов с диэлектриком 10 мкм соответствует резко сниженному среднему пробивному напряжению этих конденсаторов, как показывает сравнение кривых дифференциальной вероятности пробоя, для конденсаторов на 63, 125 и 500 в, сделанное на рис. 30, б.

В СССР было успешно освоено производство металлизированных полистирольных конденсаторов, несмотря на то, что зарубежные исследователи скептически относились к такой возможности. Свойство самовосстановления у этих конденсаторов, хотя и хуже, чем у бумажных, но достаточно для того, чтобы исключить опасность пробоя в наиболее слабых местах пленки и в связи с этим повысить $E_{\text{раб}}$ полистирольных конденсаторов до 12—13 кВ/мм при больших емкостях и до 20 кВ/мм при малых емкостях, т. е. почти в 2 раза по сравнению с конденсаторами, имеющими обкладки из фольги (см. табл. 6). В настоящее время конденсаторы большой емкости изготавливаются у нас только из металлизированной полистирольной пленки, а применение фольги сохранилось только при относительно небольших емкостях. По данным Е. И. Михайловой и Н. В. Северюхиной, при одном слое металлизированной пленки толщиной 20 мкм пробивное напряжение конденсаторов равно 1500—3000 в, а при одном слое 30 мкм или двух по 20 мкм составляет 2800—5000 в. Соответствующие значения пробивных напряженностей равны 75—150 кВ/мм в первом случае и 93—166 кВ/мм во втором.

В СССР металлизированные полистирольные конденсаторы изготавливаются как однослойные на номинальное напряжение 160, 250, 400 и 600 в (типы МПО и МПГО), так и многослойные (2—3 слоя пленки) на 250, 500 и 1000 в (тип МПГ). Испытательное напряжение для первых принято $1,5 U_{\text{ном}}$ и для вторых $2 U_{\text{ном}}$. Обкладки из фольги применяются в конденсаторах типов ПО и ПСО при емкостях до 0,01—0,03 мкф и номинальных напряжениях 300 и 500 в. Обычно в таких конденсаторах используется не менее двух слоев пленки, но некоторые фирмы при небольших емкостях и особо малых напряжениях (25, 32 и 63 в) допускают применение и одного слоя пленки.

По данным французской практики, при изготовлении полистирольных конденсаторов с обкладками из фольги применяют значения рабочих и испытательных напряжений, указанные в табл. 7.

Отмечается, что напряжение, принятое для цеховых испытаний, может быть приложено к конденсатору только однократно.

Зависимость объема французских конденсаторов при указанных значениях напряжения от номинальной емкости показана на рис. 31 в виде сплошных линий без точек. Пунктирные линии с точками соответствуют отечественным данным. Французские конденсаторы с наименьшим объемом (высокая надежность, 25 в, фольговые и, вероятно, однослойные) соответствуют нашим однослойным металлизированным на 600 в; отечественные

Испытательное напряжение, в		Допускаемое рабочее напряжение, в	
при цеховых испытаниях	при приемосдаточных	обычная надежность	высокая надежность
200	125	50	25
750	500	250	125
1500	1000	500	250

фольговые конденсаторы на 300 в примерно эквивалентны по объему французским конденсаторам с напряжением высокой надежности 250 в.

По данным Виганда (1963 г.), фирма «Сименс» (ФРГ) начала выпуск металлизированных тонкослойных конденсаторов типа МКУ, получая при равных значениях номинальных напряжений с фольговыми конденсаторами объем, в 25 раз меньший. Характеристики этих конденсаторов приведены ниже (§ 26).

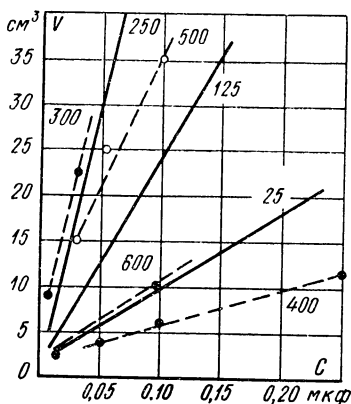


Рис. 31. Зависимость объема полистирольных конденсаторов от номинальной емкости при различных номинальных напряжениях

300 — фольговые; 500 — МПГ; 400 и 600 — МПО

Указанные выше значения номинальных напряжений соответствуют работе при постоянном токе. При переменном токе напряжение должно быть снижено, чтобы предотвратить возможность развития ионизации или разогрева конденсатора за счет потерь энергии. Значения переменного напряжения, допускаемые по отечественным нормам для металлопленочных конденсаторов типов МПО, МПГ и МПГО, приведены в табл. 8.

Для фольговых конденсаторов типов ПО и ПОС оговаривается только рабочее напряжение постоянного тока. Для малогабаритных конденсаторов малой емкости типа ПМ оговаривается рабочее напряжение постоянного тока или амплитудное напряжение переменного тока не свыше 60 в.

Зарубежные фирмы для обычных типов полистирольных конденсаторов обычно ограничиваются указанием только номинального напряжения постоянного тока. Фирма «СЭЛ» (ФРГ), выпускающая полистирольные конденсаторы с номинальным напряжением от 25 до 630 в, оговаривает допускаемую величину чисто переменного напряжения не выше $0,4 U_{\text{ном}}$. Таким обра-

Таблица 8

Тип конденсатора	Номинальное напряжение, <i>в</i> (постоянный ток)	Частота, <i>гц</i>		
		до 500	500 до 10 ⁴	10 ⁴ до 10 ⁶
		амплитуда переменного напряжения, <i>в</i>		
МПГО, МПО	160	100	20	—
МПГО, МПО	250	200	50	—
МПГ	250	125	100	—
МПГО, МПО	400	250	100	20
МПГ	500	250	100	50
МПГО, МПО	600	250	100	20
МПГ	1000	250	100	50

зом, при напряжении 630 *в* постоянного тока переменное напряжение не должно быть выше 252 *в*. Эта цифра, хорошо согласующаяся с максимальным значением переменного напряжения 250 *в* в табл. 8, выбрана с таким расчетом, чтобы была исключена возможность возникновения ионизации, поскольку это напряжение лежит ниже минимального возможного пробивного напряжения воздуха.

§ 8. Полистирольные конденсаторы с повышенным напряжением и с повышенной реактивной мощностью

При изготовлении полистирольного конденсатора с высоким рабочим напряжением постоянного тока для умеренной рабочей температуры можно не опасаться интенсивного развития ионизации и получать достаточно надежную работу конденсатора простым подбором толщины диэлектрика, обеспечивающим пужный запас электрической прочности по отношению к пробое при кратковременном воздействии напряжения, с учетом небольшого снижения $E_{пр}$ с течением времени. Конденсаторы такого типа (открытой конструкции с малыми значениями номинальной емкости) находят себе применение в современной электронной технике, в частности в телевизионных устройствах.

В СССР изготавливаются конденсаторы типа ПОВ с номинальной емкостью $390 \text{ нф} \pm 20\%$ (номинальное рабочее напряжение 10 и 15 *кв* постоянного тока); испытательное напряжение соответственно равно 15 и 25 *кв*; интервал рабочей температуры от 0 до 60°С (допускается периодическая работа не более 4 ч при 70°С). Объем конденсаторов 12,5 и 14 *см*³, вес 12 и 18 *г*.

Предприятие «Тесла» (ЧССР) выпускает целую серию подобных конденсаторов (рис. 32) с испытательным напряжением, равным $2,5 U_{ном}$. Номинальная емкость конденсаторов от 10 *нф* до 0,01 *мкф* при 1 *кв*, до 0,002 *мкф* при 3 *кв*, до 0,001 *мкф* при 5 *кв* и до 500 *нф* при 5 *кв*. Допуск по емкости: ± 10 и $\pm 20\%$;

пределы рабочей температуры от -10 до $+55^{\circ}\text{C}$; $\text{tg } \delta$ не более 0,001 для емкостей от 47 до 560 нф и не более 0,0015 — для остальных емкостей; сопротивление изоляции при 20°C не ниже $2 \cdot 10^5 \text{ Мом}$. Конденсатор на 10 кв емкостью 500 нф имеет размеры: $\varnothing 17 \times 50 \text{ мм}$, что дает объем 11,3 см^3 , близкий к объему конденсатора типа ПОВ на 390 нф при 10 кв .

Аналогичные конденсаторы изготавливаются и в ГДР на номинальные напряжения 3, 6,3 и 10 кв с испытательным напряжением, равным $3 U_{\text{ном}}$.

При переходе к переменному напряжению даже низкой частоты при повышенных значениях напряжения, превышающих

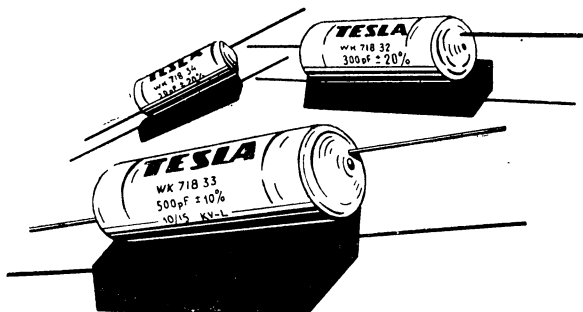


Рис. 32. Полистирольные конденсаторы малой емкости с рабочим напряжением постоянного тока от 1 до 10 кв (фирма «Тесла», ЧССР)

минимальное значение пробивного напряжения воздуха, т. е. выше 300 в, возникает опасность появления ионизационных процессов, вызывающих быстрое старение пленочного органического диэлектрика и пробой конденсатора. По данным С. Н. Койкова, зависимость срока службы пленочного конденсатора и частоты следования разрядов от напряжения при переменном напряжении определяется теми же уравнениями (17), как и при постоянном напряжении (но при других постоянных значениях коэффициентов); однако в отличие от постоянного напряжения, когда срок службы и частота следования разрядов зависят от температуры [согласно уравнениям (16)], при переменном напряжении этой зависимости не наблюдается, во всяком случае в том интервале температур, который был обследован С. Н. Койковым ($20-85^{\circ}\text{C}$ для полистирола, $20-150^{\circ}\text{C}$ для ПЭТФ и $20-100^{\circ}\text{C}$ для ПТФЭ).

Этот автор считает, что обнаруженные им закономерности старения полимерных диэлектриков в переменном электрическом поле определяются постепенно ускоряющимся процессом эрозии пленки по мере прорастания канала в локальном участке. При этом существенная эрозия происходит только при непосредственном воздействии разрядов на поверхность пленки и при

наличии достаточного доступа кислорода. С этими данными согласуется гипотеза Хоугена, согласно которой в результате электронной бомбардировки в полимере возникают макрорадикалы, вступающие затем в цепную реакцию с кислородом воздуха, что обуславливает быстрое окисление полимера до летучих продуктов.

Поскольку ионизационные процессы при переменном напряжении столь опасны для пленочного конденсатора, содержащего остаточные воздушные включения, приходится добиваться, чтобы напряжение начала ионизации лежало бы выше рабочего напряжения конденсатора. При этом надо иметь в виду, что повышение толщины диэлектрика не дает существенного повышения напряжения начала ионизации конденсатора. Так, по данным А. П. Бутра, при увеличении толщины полистирольного диэлектрика от $2 \times 20 = 40$ мкм до $3 \times 20 = 60$ мкм напряжение начала ионизации конденсаторных секций изменилось от 410—440 до 420—470 в, что соответствует снижению ионизирующей напряженности $E_{\text{и}}$ при переходе от 40 к 60 мкм от значения 10,2—10,7 до 7—7,8 кВ/мм. Как было показано выше (рис. 10), запекание практически не изменяет величину напряжения начала ионизации (появления частичных разрядов), и для запеченных секций перегиб кривой $\text{tg } \delta = f(U)$, свидетельствующий о появлении частичных разрядов, также происходит где-то около 400 в. Однако при последовательном соединении секций, намотанных из полистирольной пленки, во избежание ионизации обычно принимают рабочее напряжение на каждую секцию не выше 250 в, т. е. заведомо ниже не только измеренного напряжения начала ионизации, но и минимального напряжения пробоя воздуха.

Применение пропитки позволяет повысить напряжение начала ионизации (рис. 21) и соответственно рабочее напряжение секций, а следовательно, сократить число последовательно соединяемых секций и уменьшить размеры и вес конденсатора. Кривые на рис. 21 получены для секций емкостью 0,03 мкФ с толщиной диэлектрика 3×30 мкм; кривая 1 получена до пропитки (незапеченная секция), а кривая 2 — после пропитки хорошо очищенным нефтяным маслом. Перегиб кривой после пропитки сместился от напряжения менее 500 в до напряжения более 1500 в, т. е. можно считать, что в данном примере напряжение начала ионизации возросло более чем в 3 раза. Для пропитанного конденсатора $E_{\text{и}}$ оказалось равным 17 кВ/мм.

По приведенным выше данным Красуцкого (§ 6) при меньших значениях емкости и пропитке при высоком вакууме можно получать и более высокие значения $E_{\text{и}}$.

В электротермических установках с машинными генераторами при частотах 1—10 кГц и напряжениях примерно сотен вольт или нескольких киловольт ранее применялись только бумажные конденсаторы. Большие потери требовали применения водяного

охлаждения, чтобы устранить опасность чрезмерного перегрева конденсатора; это усложняло и утяжеляло конструкцию. При пропитке маслом в зависимости от рабочей частоты удельные характеристики электротермических бумажных конденсаторов составляли 6—10 *квар/дм³* и 3,5—6 *квар/кГ*; при пропитке хлордифенилом удельная реактивная мощность была повышена до 14—21 *квар/дм³*. Применение полистирольной пленки в подобных конденсаторах позволяет снизить потери более чем в 10 раз и изготавливать конденсаторы с естественным воздушным охлаждением более простой конструкции а в некоторых случаях и с лучшими удельными характеристиками.

По данным Вальдбаха (1957 г.), полистирольные конденсаторы для электротермических устройств могут применяться в диапазоне частот 0,5—10 *кГц* при напряжениях от 200 до 3000 *в*, т. е. при тех же режимах, как и бумажные конденсаторы с водяным охлаждением. В ГДР в течение ряда лет проводились работы по усовершенствованию данного типа полистирольных конденсаторов: выбран специальный тип масла, введены плоскопрессованные секции вместо цилиндрических и применена приварка выводов к обкладкам (алюминиевая фольга 6 *мкм*) для снижения потерь в переходных контактах. Удельные характеристики полистирольно-масляного конденсатора реактивной мощностью 57 *квар* составляли 16,7 *квар/дм³* и 7,7 *квар/кГ*.

Как было отмечено в § 6, выбор пропитывающей жидкости для полистирольных конденсаторов связан с известными трудностями, а потому наравне с полистирольно-масляными применяют также и полистирольно-воздушные конденсаторы, причем в этом случае берут не выше 250 *в* на каждую последовательно соединяемую секцию. В сообщениях некоторых западноевропейских фирм можно было найти данные о выпуске подобных конденсаторов мощностью 20 *квар* при частоте 10 *кГц*. Удельные характеристики не приводились, но можно было думать, что они хуже, чем у полистирольно-масляных конденсаторов.

Завод «Конденсатор» изготовил в 1956 г. опытный полистирольно-воздушный конденсатор реактивной мощностью 120 *квар* при напряжении 375 *в* и частоте 8 *кГц*; конденсатор имел размеры корпуса 115×380×330 *мм*, что дает удельную мощность порядка 8,35 *квар/дм³*. В 1960—1961 гг. были разработаны полистирольные конденсаторы с реактивной мощностью в корпусе порядка 75 *квар* при частотах 2400 и 3000 *Гц* и напряжении 360—380 *в*. Удельная мощность этих конденсаторов при пониженной частоте составляла 4,35 *квар/дм³*.

В работе Е. Л. Гинзбурга (1962 г.) указано, что зависимость напряжения начала ионизации в непропитанных полистирольных конденсаторах от толщины диэлектрика характеризуется следующими цифрами: 20 *мкм*—330 *в*; 40 *мкм*—400 *в*; 60 *мкм*—450 *в*; 80 *мкм*—520 *в* и 100 *мкм*—560 *в*. При пропитке хорошо очищенным нефтяным маслом напряжение на-

чала ионизации резко возрастает. Так, при испытании опытных секций с диэлектриком 3×20 мкм, пропитанных маслом, при напряжении в 3 раза более высоком, чем напряжение начала ионизации для непропитанных секций с той же толщиной изоляции, было установлено, что в продолжении нескольких суток не наблюдалось не только пробоя секций, но и повышения их угла потерь. В то же время для непропитанных секций при превышении порога ионизации в два раза (частота 50 гц) за 8 ч угол потерь увеличился в 4 раза. Аналогичные результаты были получены и при 2 кГц. За 24 ч секции с трехслойным диэлектриком при напряжении 450 в (примерно равном напряжению начала ионизации) и $E = 7,5$ кВ/мм дали до 10% пробоев. Предварительное испытание при 400 в (т. е. заведомо ниже порога ионизации) показало, что в течение двух суток не было ни одного случая пробоя.

После пропитки емкость конденсаторов возрастает на 3—5%, а тангенс угла потерь — в 1,5 раза. При 20°С угол потерь пропитанных конденсаторов равен $2-3 \cdot 10^{-4}$; при температуре 55—60°С он возрастает в 1,5—2 раза. При повышении частоты эти значения увеличиваются за счет увеличения потерь в обкладках. Желательно применять фольгу толщиной 16 мкм и намотку с выступающей обкладкой. Перегрев конденсаторов в номинальном режиме составлял 10—15°С при выступающей фольге и 15—18°С при скрытой фольге. В конденсаторах типа МС, рассчитанных на частоту 2400—3000 гц, была принята рабочая напряженность 6—6,5 кВ/мм (диэлектрик 3×20 мкм), что не является пределом.

Гинзбург отмечает, что наиболее выгодный диапазон частот для использования полистирольных конденсаторов 10—30 кГц. Конденсатор типа МС на частоту 25 кГц, 450 в и 63 квар имеет размеры $380 \times 126 \times 350$ мм и удельную мощность 3,7 квар/дм³, в то время как бумажные конденсаторы на эту частоту вообще не изготавливаются. При более низких частотах полистирольный конденсатор имеет удельные характеристики лучше, чем бумажный конденсатор без водяного охлаждения, но хуже, чем бумажный с водяным охлаждением. Однако при этом надо принимать во внимание упрощение конструкции, связанное с отказом от водяного охлаждения. При частотах 100—500 кГц более выгодными оказываются керамические высокочастотные конденсаторы. Приведенные здесь удельные характеристики соответствуют начальному этапу работы по разработке полистирольных силовых конденсаторов в СССР, а потому не могут рассматриваться как предельные.

Бельгийский опыт изготовления полистирольных конденсаторов для электротермических устройств был довольно подробно освещен в работе Боццини и Байарда (1962 г.). Они отмечают, что хотя полистирольная пленка может быть получена толщиной 6,25 мкм со средней электрической прочностью

64 кв/мм, но в ней много слабых мест и одна более толстая пленка лучше, чем набор той же толщины из столь тонких пленок. При толщине пленки 9,5—12,5 мм опыт показал, что два слоя менее надежны, чем три. Применение пропитки сглаживает влияние неравномерностей толщины полистирольной пленки (доходящих до 25% от номинальной толщины) и, как отмечалось выше, повышает напряжение начала ионизации. Пропиточная масса должна иметь диэлектрическую проницаемость, близкую к ϵ для полистирола, т. е. быть неполярной и иметь небольшую вязкость, позволяющую вести пропитку при таких температурах, которые еще не опасны для малонагревостойкого полистирола; пропиточная жидкость не должна агрессивно действовать на полистирольную пленку.

В конденсаторах применены плоскопрессованные секции с выступающей фольгой (они дают лучшее использование объема корпуса, чем цилиндрические, хотя последние проще в намотке и позволяют легче обжимать фольгу на торцах). Для правильного выбора $E_{\text{раб}}$ проводились испытания реальных опытных секций с большой площадью обкладок сначала при частоте 50 гц и повышенной температуре, а затем при частотах 4,8 и 8 кгц. Испытания показали, что увеличение закраины от 3 до 5 мм заметно увеличивает срок службы; было также показано, что конденсаторы могут длительно работать при температуре наиболее нагретой точки 75—80° С; временно можно допускать повышение этой температуры до 90° С. Средняя электрическая прочность секций при частоте 50 гц составляла около 100 кв/мм; длительно допускаемая рабочая напряженность в диапазоне частот 1—10 кгц $E_{\text{раб}} = 8$ кв/мм; перед пропиткой секции испытывались напряжением $2,3 U_{\text{ном}}$.

Корпус конденсатора медный; внутренние соединения сварные. Конденсатор собран из четырех независимых групп секций с индивидуальными изолированными выводами на крышке. Размеры корпуса 342×134×492 мм, что дает объем 27 дм³; высота с изоляторами 576,5 мм. Номинальные данные и соответствующие им удельные характеристики зависели от частоты: при переходе от 1 к 10 кгц номинальная мощность увеличивалась от 100 до 300 квар, а удельная мощность — от 4,4 до 13,2 квар/дм³.

Потери в конденсаторах были ниже 0,4—0,5 вт/квар при частоте 8 кгц. Конденсаторы могли длительно выдерживать напряжение $1,05 U_{\text{ном}}$ и ток (мощность) на 15% выше номинального. В течение времени, равного половине тепловой постоянной времени конденсатора, он должен был выдерживать ток, равный 1,3 номинального значения, при напряжении, равном или меньшем $1,05$ номинального.

Полистирольные конденсаторы для электротермических установок изготавливаются также в Италии фирмой «Икар». Как

показывает фотография (рис. 33), любезно предоставленная проф. Дзанобетти, в конструкции этих конденсаторов используются не плоскопрессованные, а цилиндрические секции, разбитые на 6 групп с индивидуальными парами выводов на

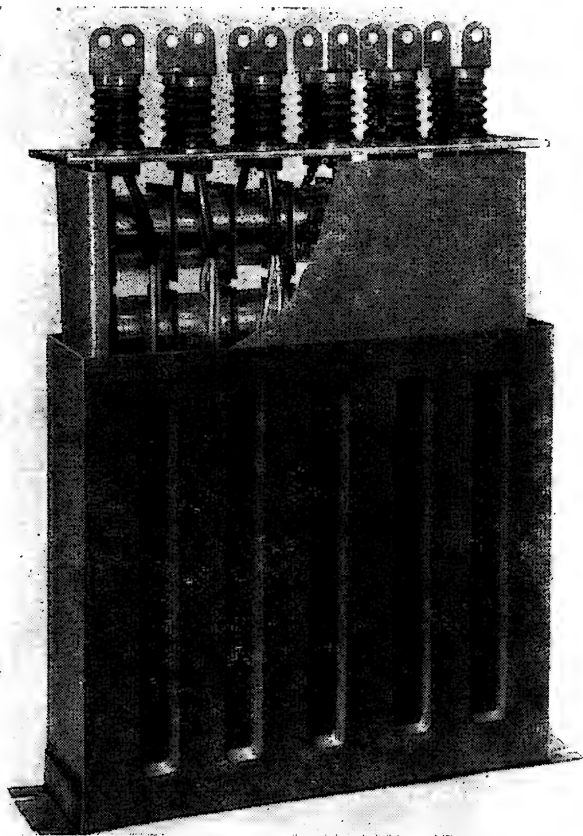


Рис. 33. Полистирольный конденсатор с большой реактивной мощностью фирмы «Икар» (Италия): 300 квар, 500 в, 10 кГц

крышке. Для пропитки использовано минеральное масло. Номинальные данные конденсатора: 300 квар, 500 в, частота 10 кГц; удельная мощность 15 квар/дм³.

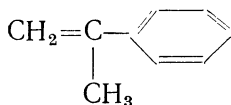
§ 9. Применение сополимеров полистирола в конденсаторостроении

Используя пленку полистирола, можно получить конденсаторы с первоклассными свойствами: малым углом потерь, высокой постоянной времени, малой абсорбцией и высокой

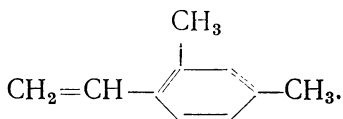
точностью и стабильностью емкости. Однако эти конденсаторы обладают существенным недостатком — малой нагревостойкостью, которая в ряде случаев ограничивает возможность их использования. Кроме того, малая нагревостойкость создает технологические трудности при проведении операций пайки или приварки контактов к обкладкам, операций металлизации пленки и контактирования торцов металлопленочных секций, операций сушки и пропитки при изготовлении конденсаторов с большой реактивной мощностью и т. п.

Для повышения нагревостойкости была опробована сополимеризация стирола с другими соединениями, обладающими повышенной температурой размягчения. В обзорной работе Уайтхеда (1953 г.) отмечалось, что нагревостойкость до 120°С может быть получена при сополимеризации стирола с некоторыми производными нафталина. В СССР этот путь был опробован Н. Ф. Умановой и А. В. Голубевой с сотрудниками, которые изучали продукты сополимеризации стирола с α - и β -винилнафталином.

Более интересным компонентом для сополимеризации со стиролом оказался α -метилстирол, имеющий формулу:



или диметилстирол



В работе Тернера (1961 г.) приводятся следующие данные о сополимере стирола с метилстиролом, опробованном в Англии для получения пленки методом продавливания с вытяжкой (как и в производстве ориентированной полистирольной пленки): плотность 1,05 г/см³; временное сопротивление разрыву 560 кг/см²; удлинение 2%; модуль упругости 2,8 · 10⁴ кг/см²; температура размягчения 130°С; $\epsilon=2,54$ и $\text{tg } \delta=3 \cdot 10^{-4}$ при частоте 50 гц. Однако пленка из сополимера стирола с метилстиролом не получила сколь-нибудь широкого применения в зарубежном конденсаторостроении, судя по отсутствию рекламных данных о конденсаторах из такой пленки. Возможно, что это связано с широким применением поликарбонатной пленки зарубежными фирмами для изготовления стабильных конденсаторов в последние годы.

В СССР была проведена успешная разработка пленки из сополимера стирола с α -метилстиролом, получившей название

«Самп». Выпуск такой пленки толщиной 15 и 20 $\mu\text{км}$ с допуском 10% начат на одном из наших химических заводов. Пленка имеет следующие характеристики: временное сопротивление разрыву не ниже 550 кг/см^2 при удлинении 2%, $\epsilon=2-2,6$, $\text{tg } \delta$ не более $4 \cdot 10^{-4}$, $\rho_{\text{об}}$ не менее $10^{17} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при 20°C и не менее $10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при 100°C ; пробивная напряженность при испытании в один слой не менее 140 кв/мм (постоянный ток); пределы рабочей температуры в конденсаторах от -60 до $+100^\circ \text{C}$.

На основе использования этой пленки разработана серия конденсаторов К71-3 металлопленочного типа, которые по своим свойствам близки к нормальным металлизированным полистирольным конденсаторам, но отличаются от них повышенным до 100°C верхним пределом рабочей температуры. Номинальное рабочее напряжение этих конденсаторов установлено для температуры до 80°C и при температуре $85-100^\circ \text{C}$ должно снижаться до 0,7 от номинального значения:

Номинальное напряжение, в	160	250	500	630
Допускаемое напряжение, в, при 85—100°С	110	175	280	450

Максимальные значения емкости — до 10 $\mu\text{кф}$ при напряжении 160 в и до 2 $\mu\text{кф}$ при 250 в; допуск по емкости — от ± 2 до $\pm 20\%$. Толщина пленки, применяемой в этих конденсаторах, составляет 20 $\mu\text{км}$.

Вторая серия металлопленочных конденсаторов из пленки «Самп» рассчитана на применение в схемах печатного монтажа для пределов рабочей температуры от -60 до $+85^\circ \text{C}$ и влажности до 98% при 40°C . Пределы номинальной емкости от 0,01 до 0,1 $\mu\text{кф}$ с допуском $\pm 5, 10$ и 20% . Конденсаторы изготовляются из пленки толщиной 15 $\mu\text{км}$ и рассчитаны на рабочее напряжение 100 в, что дает значение $E_{\text{раб}}$ около 7 кв/мм . Испытательное напряжение 150 в (10 сек). Температурный коэффициент емкости не более $-120 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\text{tg } \delta$ при 20°C не более $15 \cdot 10^{-4}$ и при 85°C не более $21 \cdot 10^{-4}$. Сопротивление изоляции при 20°C не менее 50 000 Мом и при 85°C не менее 1000 Мом . После воздействия 5 циклов изменения температуры от -60 до $+85^\circ \text{C}$ необратимое изменение емкости должно быть не более $\pm 0,5\%$, а после работы 250 ч при 1,2 $U_{\text{ном}}$ и 85°C — не более $\pm 2\%$. Вероятность безотказной работы в течение 1000 ч при 85°C гарантируется не менее 0,99, что соответствует $\lambda = 1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$.

Приведенные данные показывают, что, используя пленку из сополимера стирола с метилстиролом, можно изготавливать конденсаторы, близкие по свойствам к обычным полистирольным конденсаторам, но с рабочей температурой $85-100^\circ \text{C}$ вместо $60-70^\circ \text{C}$.

§ 10. Полиэтиленовая пленка и ее применение в конденсаторостроении

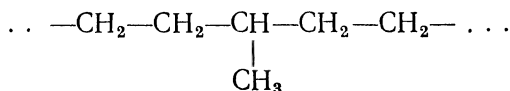
Исходным веществом для получения полиэтилена служит этилен $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, имеющий температуру плавления 169°C , температуру кипения $113,8^\circ\text{C}$ и плотность 0,570 (при температуре кипения). Этилен представляет собой дешевое и доступное сырье, получаемое путем переработки нефти; в связи с этим полиэтилен является одним из наиболее дешевых высокомолекулярных материалов и производство его быстро расширяется.

В зависимости от условий полимеризации из этилена могут быть получены разнообразные продукты, начиная от жидких и кончая твердыми. Мы рассмотрим здесь только твердый полиэтилен. Получение этого продукта было осуществлено вначале с помощью сложной технологии, требовавшей применения давления до 3000 ат и температуры 200°C . В дальнейшем удалось снизить давление, необходимое для проведения полимеризации полиэтилена до 1500—2000 ат. Такой полиэтилен известен под названием полиэтилена высокого давления (ПВД); его молекулярный вес составляет 15 000—35 000. Используя специальные катализаторы, выпускают также полиэтилен низкого давления (ПНД), получаемый при нормальном давлении или при давлении 20—50 ат.

Молекулы полиэтилена имеют зигзагообразную плоскую структуру, характерную для обычной парафиновой цепи:



Это линейная неразветвленная структура; могут иногда встречаться и редкие боковые метильные группы:



Большее разветвление структуры молекулы наблюдается для ПВД, чем для ПНД. Кроме метильных групп, в полиэтилене могут содержаться также атомы кислорода, образующие группы $-\text{CO}-$. Высокая симметричность макроцепи молекул полиэтилена объясняет склонность его к кристаллизации, несмотря на малые межмолекулярные силы. В обычных температурных условиях полиэтилен состоит примерно на 75% из кристаллической фазы и на 25% из аморфной. Можно заметно увеличить содержание аморфной фазы путем «закалки» полиэтилена, т. е. его нагрева и резкого охлаждения, при котором кристаллизация не успевает завершиться. Наличие аморфной фазы придает полиэтилену морозостойкость (до -70 — -80°C); кристаллическая фаза, имеющая точку плавления 110 — 115°C ,

обеспечивает жесткость полиэтилена при нормальных температурах и позволяет применять его до температур примерно 90°C .

Плотность полиэтилена составляет $0,92\text{--}0,95\text{ г/см}^3$, т. е. ниже, чем у полистирола. По прочности на разрыв он уступает полистиролу, но отличается от него увеличенной эластичностью. При испытании опытных пленок толщиной $10\text{--}20\text{ мкм}$ были получены значения: $\sigma_p = 800\text{--}1000\text{ кг/см}^2$ и удлинение $100\text{--}200\%$.

Полиэтилен может перерабатываться в пленку таким же методом, что и полистирол, т. е. выдавливаясь в горячем виде с растягиванием. Чаще, однако, для изготовления полиэтиленовой пленки применяют метод выдувания. Поршень выжимает расплавленный полиэтилен в камеру, в которую по трубке подается сжатый воздух. Полиэтилен образует тонкостенный пузырь («колбаску»), причем происходит и процесс растягивания пленки (стенок пузыря); на вальцах «колбаска» сплющивается и разрезается на две ленты, наматываемые на шпиндели. Этим методом из полиэтилена изготавливают пленки толщиной до нескольких десятков микрон.

Полиэтилен представляет собой типичный неполярный диэлектрик, он имеет в широком диапазоне частот $\epsilon = 2,2\text{--}2,3$, т. е. несколько ниже, чем у полистирола; зависимость ϵ от температуры выражена сильнее, чем у полистирола и некоторых других неполярных пленок, что является существенным недостатком полиэтиленовой пленки при ее использовании в конденсаторостроении. В конденсаторах с обкладками из фольги наличие зазора снижает эффективное значение ϵ , которое Мистич рекомендует брать равным $1,85$.

Некоторые данные об электрических свойствах полиэтилена, взятые из обзорной работы Г. П. Михайлова, приведены на рис. 34. Угол потерь чистого полиэтилена того же порядка, что и у полистирола, или ненамного выше; однако в отличие от полистирола на кривой $\text{tg } \delta = f(t)$ для полиэтилена наблюдается ряд максимумов (рис. 34, а). Это объясняется тем, что полистирол применяется ниже температуры его остеклования, а полиэтилен выше этой температуры, что позволяет проявляться ряду явлений релаксационного характера. У полиэтилена ПНД (кривая 1) наблюдаются два максимума: низкотемпературный и высокотемпературный; первый из них связан с наличием небольшого числа полярных групп: —CO— , а второй — с релаксацией звеньев макромолекулы. После закалки, увеличивающей содержание аморфной фазы, высокотемпературный максимум сильно сдвигается влево (кривая 2), так как движение звеньев облегчается при уменьшении числа кристаллизованных областей. У полиэтилена ПВД наблюдается три максимума (кривая 3); можно полагать, что появление третьего максимума связано с большей разветвленностью молекул ПВД. Эти данные получены при частоте 1 кгц . Электрические

свойства полиэтилена заметно зависят от его загрязнения продуктами окисления (группы $-\text{CO}-$; рис. 34, б), или следами катализатора, о которых можно судить по увеличению зольности (рис. 34, в) : 1 — зольность 0,03%; 2 — 0,30%. Удельное сопро-

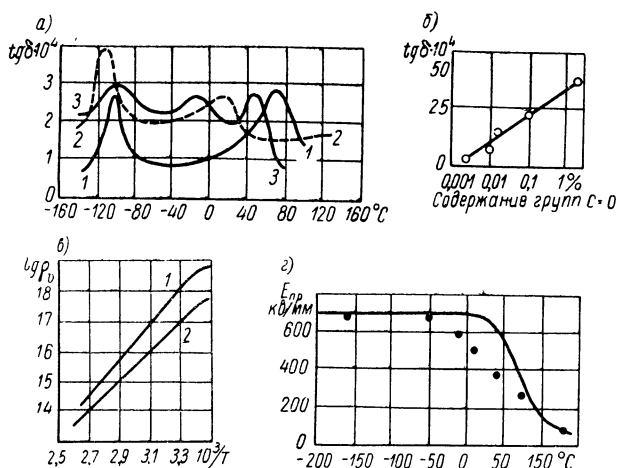


Рис. 34. Электрические свойства полиэтилена

тивление полиэтилена велико, но все же ниже, чем у полистирола.

Внутренняя электрическая прочность полиэтилена для тонких пленок может превышать 600 кВ/мм (рис. 34, г), но снижается при повышении температуры.

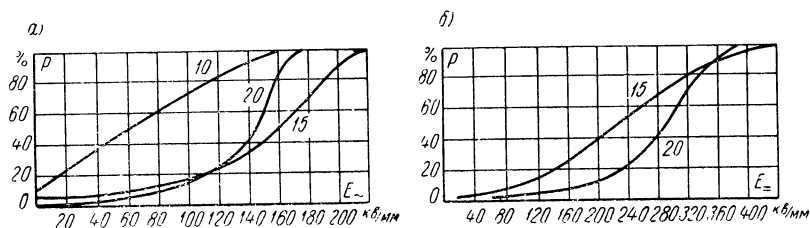


Рис. 35. Разброс пробивной напряженности пленок полиэтилена при переменном (а) и постоянном (б) напряжениях. Цифры у кривых — толщина пленок в микронах

На рис. 35 показан разброс значений электрической прочности для тонких опытных полиэтиленовых пленок, по данным Л. В. Сидоровой (а — при переменном, б — при постоянном токе; цифры у кривых — толщина пленок в микронах). Максимальные значения при постоянном токе составляют 350—

400 кв/мм, т. е. приближаются к значению внутренней прочности, но средние значения много ниже, так как наблюдается большое число пробоев при низких напряжениях и даже нулевые точки; таких точек можно увидеть особенно много при толщине 10 мкм (при испытании переменным напряжением), для этой пленки вероятность пробоя 50% достигается всего лишь при 60 кв/мм.

По данным Н. А. Родионовой, гигроскопичность полиэтилена выше, чем у полистирола и при длительной выдержке в условиях влажности 98% достигает 1,3%; однако изменение его электрических свойств при поглощении влаги меньше, чем у полистирола. Коэффициент влагопроницаемости у полиэтилена, равный $2,8 \cdot 10^{-10}$ г/см²·ч·торр, значительно ниже, чем у полистирола; то же можно сказать и о коэффициенте диффузии, который для полиэтилена равен всего $1 \cdot 10^{-5}$ см²/ч.

Как было указано выше, нагревостойкость полиэтилена составляет около 90°С, т. е. несколько выше, чем у полистирола, но все же недостаточно высокая для многих случаев применения конденсаторов. Нагревостойкость пленки может быть повышена облучением за счет появления поперечных связей между линейными молекулами.¹

По данным Гвиннера (1962 г.), облучение позволяет поднять нагревостойкость полиэтиленовой пленки до 105°С; подобная пленка выпускается в США под названием «Ирратен». При добавке стабилизаторов такая пленка допускает нагрев до 125°С.

Основные сведения о полиэтиленовых конденсаторах можно было найти в работе Мистича (США); некоторые сведения приводятся также в обзоре Козенса (Англия). Мистич указывал толщину полиэтиленовой пленки, равную 37—50 мкм, что согласовывалось с данными Козенса, 40—50 мкм. При таких значениях толщины пленки ее можно было использовать только в конденсаторах с относительно высоким рабочим напряжением. В США полиэтиленовая пленка использовалась для изготовления высоковольтных конденсаторов высокого напряжения и радиочастоты, а также для конденсаторов линий формирования импульсов в радиолокационной аппаратуре.

Выше мы упомянули об испытании опытных пленок из полиэтилена толщиной 10—20 мкм. По-видимому, такие пленки появились и за рубежом; в частности, Гвиннер отмечает возможность получения толщины 10 мкм при дополнительной вытяжке пленки. Появление пленок таких толщин позволило применить полиэтилен и в конденсаторах низкого напряжения, например в Японии.

В отличие от жесткой полистирольной пленка полиэтилена эластична, что уменьшает опасность появления слабых мест

¹ Англ. пат., кл. 37, № 758197, 3.10.1956, Шен Тзу Ен; англ. пат., кл. 37, № 910245, 14.11.62, А. Р. Джилберт.

в диэлектрике конденсатора, обусловленных хрупкостью материала. При использовании пленки в указанных выше больших толщинах осаждение частичек пыли, обусловленное электризацией пленки, также менее опасно для диэлектрика. Поэтому можно ожидать возможности некоторого повышения значений $E_{\text{раб}}$ по сравнению с полистиролом.

Полиэтиленовая пленка, как и полистирольная, является ориентированной, а потому для нее возможно применение операции запекания, но при соответственно повышенной температуре. Изменение емкости секций, намотанных из полиэтиленовой пленки и алюминиевой фольги, в процессе их запекания при 130 и 135°С составляет 2—4%. Однако в отличие от полистирольных конденсаторов не наблюдается такого же плотного слипания витков и «остекловывания» торцов секции.

Стабильность емкости запеченных полиэтиленовых конденсаторов хуже, чем полистирольных. Мистич указывает, что после хранения в комнатных условиях в течение года уход емкости менее 0,3%, а после воздействия температурных циклов +85÷—60°С — 0,25%. Эти цифры представляются чрезмерно оптимистичными; Козенс указывает более высокую цифру — 0,5%.

В соответствии с более резкой зависимостью ϵ полиэтилена от температуры емкость полиэтиленовых конденсаторов сильнее изменяется с температурой, чем полистирольных. На рис. 36, а показана зависимость $C=f(t)$ для трех полиэтиленовых конденсаторов: 1, 2 — непропитанный и пропитанный диметилсиликоном конденсаторы, по данным Мистича; 3 — пропитанный кремнийорганической жидкостью «Калория-2», по данным Б. Н. Горбунова. Значения ТКЕ для этих конденсаторов составляли: 1) — $520 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; 2) — $610 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и 3) — $400 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

На рис. 36, б показана зависимость емкости от температуры для четырех однотипных непропитанных полиэтиленовых конденсаторов с диэлектриком $2 \times 15 \text{ мкм}$ и обкладками из алюминиевой фольги, по данным Л. В. Сидоровой. В пределах температуры $\pm 60^\circ\text{C}$ изменение емкости близко к прямолинейному с ТКЕ = $-320 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; дальнейшее повышение температуры заметно усиливает температурную зависимость емкости и при нагреве от 20 до 100°С снижение емкости равно 6,2—6,6%, что соответствует среднему значению ТКЕ, равному $-(770-820) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Таким образом, надо считать, что ТКЕ у полиэтиленовых конденсаторов резко увеличен, что делает их непригодными в контурах высокой частоты, требующих стабильной емкости.

Постоянная времени полиэтиленовых конденсаторов высока и приближается к тем значениям, которые имеют полистирольные конденсаторы; при комнатной температуре можно получать до 10^5 — 10^6 сек (рис. 36, в). Пропитка несколько снижает по-

стоянную времени, как и в случае полистирольных конденсаторов (пунктирная кривая). При повышении напряжения также наблюдается некоторое снижение постоянной времени (сплошные кривые — напряжение в вольтах). Японские фирмы для конденсаторов небольшой емкости (менее 0,33 мкф) гарантируют при комнатной температуре сопротивление изоляции не ниже 45 000 Мом, а для конденсаторов большей емкости — постоян-

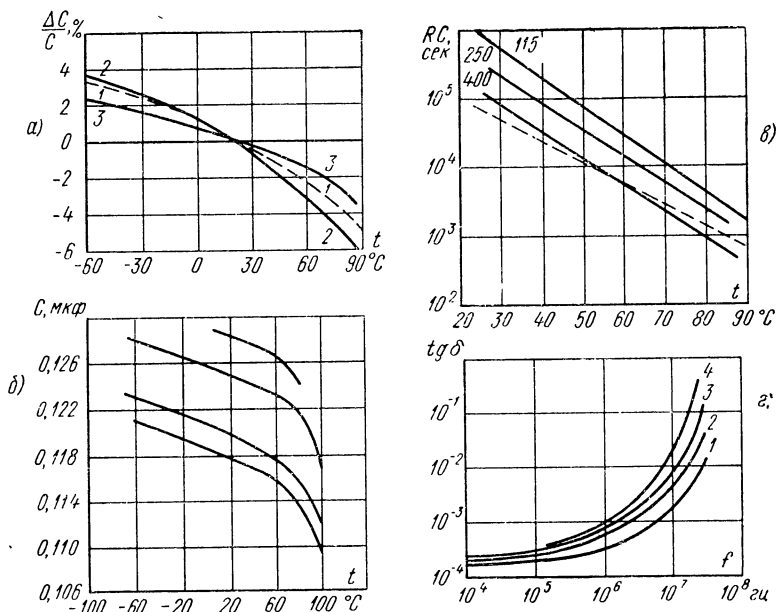


Рис. 36. Электрические характеристики полиэтиленовых конденсаторов

ную времени не ниже 15 000 сек. При изготовлении большой опытной партии полиэтиленовых конденсаторов из пленок 10—20 мкм сопротивление изоляции конденсаторов емкостью ниже 0,1 мкф при 20 $^{\circ}\text{C}$ превышало 10^5 Мом, постоянная времени при $C=0,1$ мкф оказалась равной $(1-5) \cdot 10^4$ сек, т. е. заметно ниже, чем у полистирольных конденсаторов.

Угол потерь правильно изготовленных полиэтиленовых конденсаторов весьма мал, как и у полистирольных конденсаторов. При частоте 1 кГц Мистич указывает значение менее $5 \cdot 10^{-4}$, а Козенс — $3 \cdot 10^{-4}$. При изготовлении партии конденсаторов, о которой уже упомянуто выше, подавляющее число образцов имело $\text{tg } \delta$ около $3 \cdot 10^{-4}$ или ниже; в отдельных случаях наблюдались значения $5-7 \cdot 10^{-4}$; можно было полагать, что для подобных конденсаторов можно установить норму: $\text{tg } \delta \leq 10 \cdot 10^{-4}$, как и для полистирольных конденсаторов, при частоте 1 кГц.

Японские фирмы указывают для полиэтиленовых конденсаторов $\operatorname{tg} \delta < 8 \div 10 \cdot 10^{-4}$. При повышении частоты угол потерь полиэтиленовых конденсаторов, как и полистирольных конденсаторов, возрастает за счет потерь в металлических частях (рис. 36, г, по Мистичу; 1—250 пф, 2,5 кВ; 2—1000 пф, 3,5 кВ; 3—2000 пф, 10 кВ и 4—2000 пф, 20 кВ); увеличение емкости и рабочего напряжения, приводящее к увеличению площади обкладок, сопровождается более резким увеличением угла потерь при высоких частотах. Температурная зависимость угла потерь конденсатора в основном повторяет температурную зависимость $\operatorname{tg} \delta$ полиэтилена. Будучи неполярным диэлектриком, полиэтилен должен давать малые значения коэффициента абсорбции при его использовании в конденсаторах. Все же обычно этот коэффициент у полиэтиленовых конденсаторов несколько выше, чем у полистирольных (табл. 5).

С. Н. Койков отмечает, что полиэтилен несколько более устойчив к эрозии при воздействии частичных разрядов, чем полистирол, но зато в нем более интенсивно наблюдаются такие изменения, вызванные воздействием разрядов, как уменьшение молекулярного веса, образование сшитой фракции, появление новых полос в инфракрасном спектре. Термоокислительная деструкция в присутствии кислорода также происходит в полиэтилене более интенсивно, чем в полистироле.

Поэтому для конденсаторов из полиэтилена, рассчитанных на работу при переменном напряжении, надо добиваться устранения ионизации, применяя последовательное соединение секций и пропитку. При комнатной температуре полиэтилен устойчив к разнообразным растворителям, но при температурах выше 50—60°С начинает растворяться в нефтяном масле и в хлорированных массах, т. е. плохо совместим с обычными типами пропиточных масс, широко применяемыми в конденсаторостроении. В практике США для пропитки полиэтиленовых конденсаторов обычно применяли диметилсилоксан с вязкостью выше 50 сантистокс.

По данным Мистича, напряжение начала ионизации при толщине полиэтиленового диэлектрика 25 мкм равно 500 в, а при толщине 250 мкм — 1200 в. Соответствующие значения $E_{\text{и}}$ составляют 20 и 4,8 кВ/мм. Для того чтобы ионизация отсутствовала, надо брать $E_{\text{раб}}$ ниже этих значений. Можно полагать, что они получены для непропитанных образцов и при пропитке будут выше.

При испытании опытных конденсаторов из пленки пониженной толщины 10—20 мкм были получены значения кратковременной электрической прочности при постоянном напряжении, показанные на рис. 37, а для секций емкостью 0,05—0,1 мкф. Для однослойных секций влияние слабых мест очень велико и средняя пробивная напряженность составляет всего лишь 30—40 кВ/мм; для двухслойных секций она повышается до

110—140 кв/мм, причем пленка толщиной 10 мкм, даже взятая в два слоя, дает большое число пробоев при резко сниженных напряженностях в соответствии с пониженной прочностью такой пленки (рис. 35, а). Данные рис. 37, а получены при комнатной температуре; повышение температуры до 100°С дает заметное снижение $U_{пр}$ полиэтиленовых конденсаторов, причем для двухслойных образцов появляются экзemplяры, прочность которых снижена до уровня однослойных образцов (рис. 37, б).

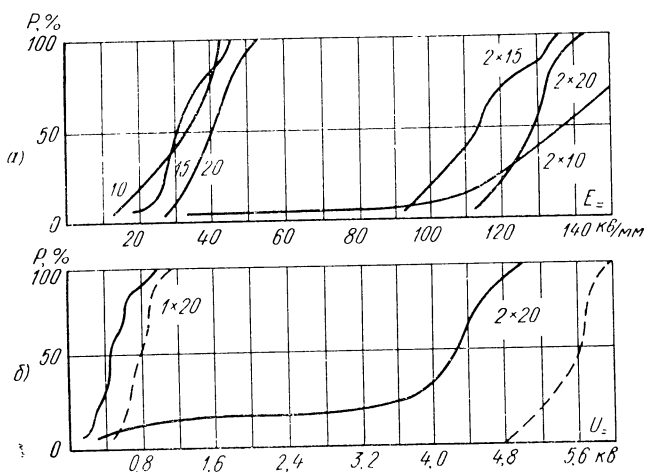


Рис. 37. Электрическая прочность полиэтиленовых конденсаторов: а — разброс $E_{пр}$ (постоянный ток) для однослойных (слева) и двухслойных конденсаторов из пленок 10, 15 и 20 мкм; б — разброс пробивных напряжений однослойных и двухслойных конденсаторов из пленки 10 мкм при 20°С (пунктир) и при 100°С (сплошные кривые)

Длительные испытания опытных конденсаторов с емкостью до 0,1 мкф с диэлектриком 2×15 и 2×20 мкм при температуре 100°С в постоянном напряжении показали, что можно считать допустимым значение $E_{раб} = 15 \text{ кв/мм}$, при котором не наблюдалось пробоев за 1500 ч испытания. При напряженности 20 кв/мм надежность конденсаторов уже недостаточно удовлетворительна, а при 26,5 кв/мм — совсем низкая. Все эти данные относятся к непропитанным секциям. Вместе с тем можно полагать, что температура 100°С для полиэтиленовых конденсаторов чрезмерно велика и, по-видимому, верхний предел температуры не следует брать выше 85—90°С. Мистич указывает пределы рабочей температуры для полиэтиленовых конденсаторов от —70 до +85°С. Японские фирмы указывают более узкие пределы; —15 ÷ +70°С; —30 ÷ +70°С; —30 ÷ +85°С. Можно

отметить, что для необлученного полиэтилена при 100°C уже заметно падает электрическая прочность (рис. 37, б) и начинает резко снижаться емкость (рис. 36, б).

Для облученного полиэтилена стабильность характеристик при повышении температуры улучшается, как показывает рис. 38, по данным Ямагами Синдзи. Для такого полиэтилена Козенс указывает рабочую температуру 120°C , а Мистич даже до 150°C . Однако хотя физическая нагревостойкость полиэтилена при облучении возрастает, остается опасность окислительной деградации при длительном нагреве, особенно в присутствии

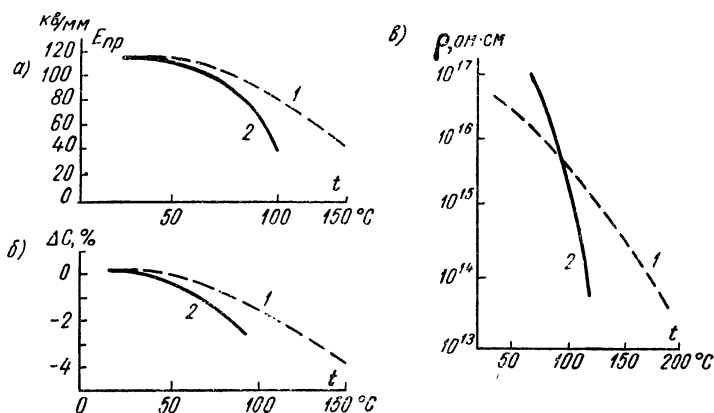


Рис. 38. Сравнение электрических характеристик облученного (1) и необлученного (2) полиэтилена

электрического поля. Мистич указывает поэтому, что полиэтиленовые конденсаторы с рабочей температурой 100°C и выше из облученной пленки должны тщательно герметизироваться, чтобы исключить доступ кислорода из окружающей среды к диэлектрику.

Сообщения Мистича об американских полиэтиленовых конденсаторах относились к 1955—56 гг., и в последние годы сообщений о производстве этих конденсаторов в США не появлялось, если не считать обзора Кепера (1968 г.), где отмечается что использование этого диэлектрика позволило повысить верхний предел емкости пленочных конденсаторов до 400 мкф (минимальная емкость полиэтиленовых конденсаторов 100 нф); пределы номинального напряжения в обзоре не указаны. В последние годы сообщения о применении полиэтилена в производстве конденсаторов появлялись в японской литературе и патентах¹. В свод-

¹ Японск. пат., кл. 59E, 102; № 8673, 6.07.60; Ямада Тадаги, Симодзато Тию.

ном каталоге японских фирм за 1966 г. имеется ряд рекламных сообщений о полиэтиленовых конденсаторах высокого и низкого напряжения, свидетельствующих о том, что в Японии применяется как толстая пленка, ранее применявшаяся в США, так и более тонкая пленка.

Используя полиэтиленовую пленку, можно получить конденсаторы примерно тех же размеров, что и полистирольные, с таким же порядком угла потерь, но с более высокой нагревостойкостью и более дешевые. Однако по величине постоянной времени и коэффициенту абсорбции они будут несколько хуже полистирольных, а по стабильности емкости во времени и при изменениях температуры — много хуже. Это обстоятельство и является одним из основных препятствий для широкого внедрения полиэтилена в производстве конденсаторов, тем более что выигрыш в нагревостойкости по сравнению с полистиролом не очень велик, а применение облучения для дополнительного повышения рабочей температуры связано с затруднениями. Кроме того, как отмечено выше, приходится опасаться термоокислительной деструкции полиэтилена, что дополнительно ограничивает возможность повышения рабочей температуры конденсаторов открытого типа; видимо, не случайно ряд японских фирм для таких конденсаторов оговаривает верхний предел температуры равным 70° С.

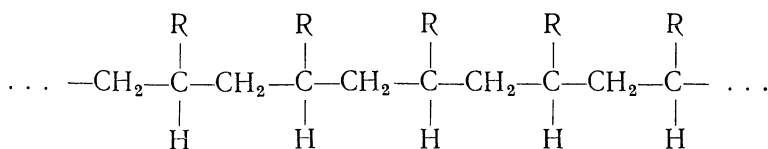
В связи с этим в СССР полиэтиленовая пленка не нашла себе применения в конденсаторостроении, если не считать отдельных случаев ее использования в конденсаторах с комбинированным диэлектриком. Можно полагать, что сейчас, когда появился новый пленочный материал из класса полиолефинов — полипропилен, имеющий ряд преимуществ перед полиэтиленом, последний уже не может считаться перспективным материалом для применения в конденсаторостроении.

§ 11. Полипропиленовая изотактическая пленка и полипропиленовые конденсаторы

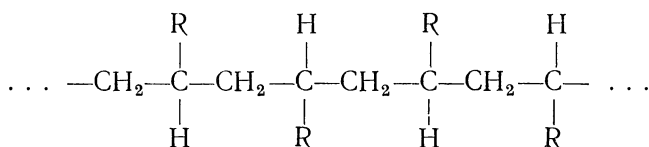
Одним из методов получения полимеров с повышенной нагревостойкостью и достаточно высокими механическими свойствами является процесс полимеризации, обеспечивающий повышенную кристалличность продукта за счет образования так называемых изотактических полимеров. Изотактическими полимерами называют полимеры, у которых достигнута регулярная монотонность в пространственном расположении молекул, обусловленная тем, что при образовании полимерной цепи молекулы создается вполне определенное и правильное расположение составляющих ее звеньев. Это можно пояснить на примере винильного соединения с боковым радикалом: $\text{CH}_2=\text{CHR}$.

В процессе полимеризации такого мономера можно получить три основных варианта строения молекулы:

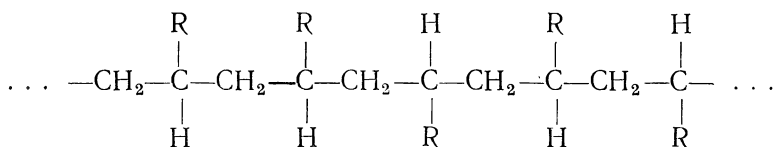
а) изотактический полимер — все радикалы расположены на одной стороне от главной цепи:



б) синдиотактический полимер — радикалы расположены по двум сторонам от главной цепи, но строго регулярно чередуются с атомами водорода:



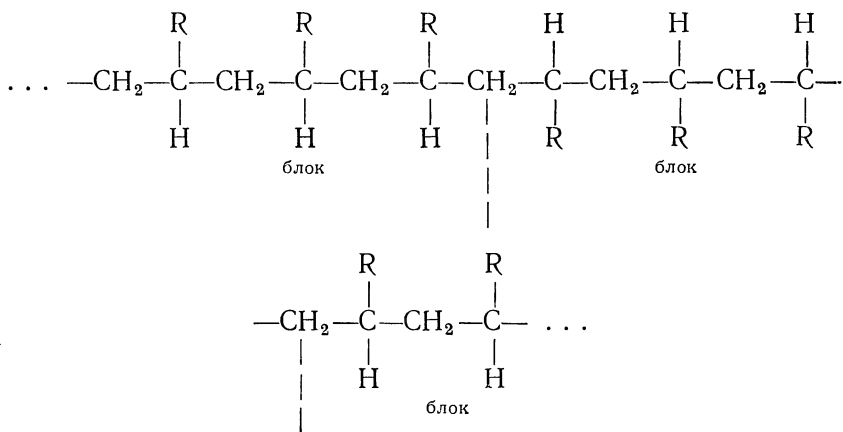
в) атактический полимер — радикалы расположены совершенно нерегулярно по обе стороны от главной цепи:



Приведенные здесь схемы дают лишь условное представление об изотактичности полимерной молекулы, так как расположены в плоскости, тогда как группировки атомов, образующие молекулу, располагаются в трехмерном пространстве; кроме того, основная цепь углеродных атомов будет не прямой линией, как на этих схемах, а может иметь более сложный вид, например винтовой спирали. Регулярная структура изотактического полимера оказывается весьма устойчивой, сохраняясь после длительного нагрева в присутствии катализаторов изомеризации (например, галоидных соединений алюминия); термическая деполимеризация таких полимеров идет очень медленно. Вместе с тем быстрое разрушение молекулы может наступить при окислении в присутствии перекисей или при воздействии элементарного хлора.

Для получения полимеров с изотактической структурой требуется применение специальных гетерогенных ионных катализаторов полимеризации; при этом обычно не удается обеспечить 100%-ное содержание изотактического полимера. Наряду с ним получается известное количество атактического продукта,

а также может образовываться стереоблочный полимер, представляющий собой регулярно построенные блоки, входящие в одну молекулярную цепь, но с разным направлением боковых радикалов в каждом блоке. В нашем примере схематически это будет выглядеть так:



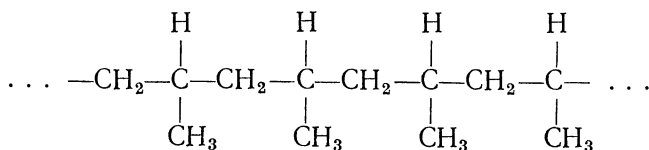
Изотактические полимерные молекулы образуют собой кристаллическую фазу в готовом продукте; энергия связи между такими молекулами может достигать нескольких килокалорий на моль. Наличие стереоблочной структуры затрудняет кристаллизацию; атактические молекулы образуют собой аморфную фазу полученного полимера.

Свойства готового продукта в значительной степени будут зависеть от количественного соотношения этих трех фаз и от распределения молекулярных весов молекул, входящих в каждую фазу. При значительном содержании изотактической кристаллической фазы можно получать продукт с повышенной нагревостойкостью и в то же время с хорошими механическими свойствами. Первым из таких продуктов, освоенных в промышленном производстве, явился один из представителей группы полиолефинов — полипропилен, разработанный впервые в Италии, где пленка из этого материала получила название «Моплефан».

Исходный мономер — пропилен $\text{CH}_2=\text{CH}\cdot\text{CH}_3$ — представляет собой газ и имеет точку кипения $48,2^\circ\text{C}$ (при давлении 749 торр). Как и этилен, он может быть получен при переработке нефти и природного газа, т. е. представляет собой дешевое и недефицитное сырье для получения полипропилена.

Полимеризацию пропилена можно вести методом, близким к методу получения полиэтилена низкого давления, добываясь высокого содержания кристаллической изотактической фазы,

обеспечивающей повышение плотности и нагревостойкости получаемого продукта. В соответствии с указанной выше схемой строение молекулы изотактического полипропилена имеет вид:



Если пропилен нерегулярной структуры имеет плотность $0,85 \text{ г/см}^3$ и температуру размягчения 75°C , то при изотактической структуре соответственно можно получать $0,92 \text{ г/см}^3$ и $160\text{—}170^\circ \text{C}$. Диаграмма растяжения для трех образцов полипропилена с различным содержанием кристаллической фазы, по данным Е. С. Корхгауза и А. П. Супрун, показана на рис. 39.

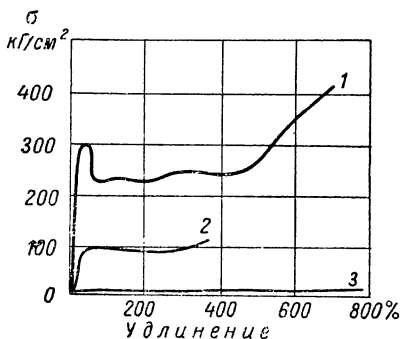


Рис. 39. Диаграммы растяжения для трех образцов полипропилена
1 — изотактический, кристалличность 75%; 2 — стереоблочный, кристалличность 50%; 3 — атактический, аморфный

Материал обладает эластичностью даже при значительном содержании кристаллической фазы и при высокой нагревостойкости, хотя и не достигающей тех значений, которые обеспечивает политетрафторэтилен, но превосходящей то, что можно ожидать от обычного полистирола или полиэтилена. В связи с лучшими ме-

ханическими свойствами полипропилена толщину пленки можно снизить в сравнении с полиэтиленом. Тэрнер сообщает, что если нижний предел для полиэтилена составляет $7,5 \text{ мкм}$, то для пропилена его можно снизить до 4 мкм .

Недавно такое значение толщины получено в промышленном масштабе фирмой «Боллоре» (Франция). Применение столь малых толщин ограничивается повышенной стоимостью тонких пленок, и обычно используются толщины порядка $10\text{—}12 \text{ мкм}$ и выше. По данным Дзанобетти и Джиганини Моки, итальянская пленка при толщине 25 мкм и частоте 50 гц имеет электрическую прочность $180\text{—}190 \text{ кВ/мм}$ в пределах температуры $50\text{—}80^\circ \text{C}$. Выпускаемая в Англии пленка «пропафилм-Е» имеет следующие свойства: плотность $0,905 \text{ г/см}^3$, температуру плавления $168\text{—}171^\circ \text{C}$, прочность на разрыв 1850 кг/см^2 при удлинении 75%. Для этой пленки $\epsilon = 2,25$, $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ и $\rho_{\text{об}}$ выше $10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см}$; при постоянном напряжении и электродах диаметром 50 мм для пленки 12 мкм величины $E_{\text{пр}} = 375\text{—}460 \text{ кВ/мм}$.

По данным 1968 г., в ФРГ выпускается полипропиленовая пленка с толщиной от 6 *мкм*.

Производство полипропиленовой пленки теперь освоено и в США. По данным Харропа (1968 г.), такая пленка, называемая «пропатен», имеет температуру плавления 165—170°С, коэффициент линейного расширения $110 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\varepsilon = 2,2$; $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ (при 1 *кГц*) и $E_{\text{пр}} = 385 \text{ кв/мм}$. При стоимости конденсаторной бумаги 0,9 *долл/фунт* стоимость полипропиленовой пленки составляет 1,4 *долл/фунт*, т. е. выше стоимости бумаги примерно только на 50%.

Первые сведения о применении полипропиленовой пленки в конденсаторостроении появились в Италии в 1963 г. в статье Протоспатаро. В ней рассматривались результаты испытания на срок службы при постоянном напряжении конденсаторов, намотанных из пленки «моплефан» толщиной 12,5 *мкм*; емкость конденсаторов 0,1 *мкф*; обкладки — алюминиевая фольга 10 *мкм*. В результате проведенных исследований и общетеоретических положений была получена формула, позволяющая оценить срок службы конденсаторов в зависимости от приложенного напряжения и температуры:

$$\tau(U, t) = A \frac{e^{B, T}}{U^n}, \quad (19)$$

где A — постоянный коэффициент; $B = 2,2 \cdot 10^4$ °К; T — абсолютная температура в °К; показатель степени $n = 5,2$ для области температур от 85 до 100°С.

Если считать, что в этой работе исследовались однослойные конденсаторы (об этом автор точно не говорит), то при толщине пленки 12,5 *мкм* указанные автором пределы напряжения 200—800 *в* соответствуют значениям $E_{\text{раб}}$ от 18 до 64 *кв/мм* при сроке службы соответственно 100 000 и 1000 *ч*.

Верхним пределом рабочей температуры для таких конденсаторов можно считать 100°С, причем переход к температурам 70—85°С позволяет значительно повысить рабочее напряжение по отношению к 100°С.

По данным Фельсинга (1969 г.), фирма «Родерштейн» (ФРГ) указывает для нового типа полипропиленовых конденсаторов более узкий интервал рабочих температур — от —25 до +70°С. Величина $\text{tg } \delta$ для конденсаторов этой фирмы при частоте 1—10 *кГц* равна $1 \cdot 10^{-4}$ (эта цифра представляется заниженной); величина ТКЕ указывается равной — $300 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По английским данным, $\text{ТКЕ} = -200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

По сообщению фирмы «Икар» (Италия), начат выпуск непропитанных конденсаторов из металлизированной полипропиленовой пленки для работы при переменном токе технической частоты при небольших значениях реактивной мощности. Подобные конденсаторы предназначаются для использования

в установках люминесцентного освещения, для мелких конденсаторных электродвигателей, и т. п. Для этих конденсаторов оговаривается интервал рабочих температур — $30 \div +70^\circ \text{C}$, испытательное напряжение (переменный ток, 2 сек) равно $1,5 U_{\text{ном}}$, допуск по емкости $\pm 10\%$, рабочая частота 50—60 гц, постоянная времени не ниже 10 000 сек и $\text{tg } \delta$ не более $30 \cdot 10^{-4}$. Конденсаторы собираются в цилиндрических алюминиевых корпусах и заливаются с торца эпоксидной смолой. Для металлизации полипропиленовой пленки использован алюминий. Размеры этих конденсаторов сравниваются с размерами бумажных конденсаторов аналогичного типа, пропитанных хлордифенилом, изготовления другой итальянской фирмы («Дукати») на рис. 40, изображающем зависимость удельного объема, рассчитанного на единицу емкости, от номинальной емкости при напряжениях 250 и 400 в (50 гц). Сплошные кривые соответствуют пропиленовым, а пунктирные — бумажным конденсаторам. В данном случае использование полипропиленовой пленки позволило заметно сократить размеры конденсаторов по сравнению с бумажными.

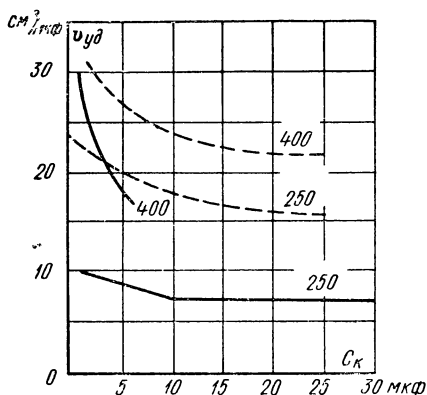


Рис. 40. Сравнение удельного объема итальянских конденсаторов для устройств люминесцентного освещения

В обзоре Кепера (1968 г.) упоминается о выпуске полипропиленовых конденсаторов в США с пределами номинальной емкости от 1 до 20 мкф и с номинальным напряжением от 300 в до 12 кв. Тангенс угла потерь при частоте 1 кгц и 25°C указан равным $1-3 \cdot 10^{-4}$.

По данным Бэна (1968 г.), фирма «Сименс» (ФРГ) разработала конденсаторы переменного напряжения малой мощности на основе полипропиленовой пленки (тип MKV), но без металлизации, а с использованием обкладок из металлизированной с обеих сторон бумаги. Эти конденсаторы пропитываются минеральным маслом. Схема намотки таких конденсаторов показана на рис. 41, а: толщина пленки 6 мкм, толщина бумаги 9 мкм. Поскольку бумага отметаллизирована с обеих сторон, она не находится в электрическом поле и потери конденсатора определяются только пленкой и маслом. Пленка несколько набухает в масле, которое заполняет в пленке все поры и неровности и повышает ее электрическую прочность.

Преимуществом данного типа конденсатора перед конденсаторами из металлизированной пленки является то, что снижение постоянной времени с напряжением наблюдается у него

при резко повышенных значениях напряженности поля (рис. 41, б). Это обусловлено тем, что при самовосстановлении конденсатора при пробое происходит деметаллизация не на поверхности пленки (диэлектрика), а на поверхности металлизированной бумаги (обкладок). После самовосстановления в таком конденсаторе не наблюдается понижения ионизирующего напряжения. При одном слое пленки 6 мкм конденсатор может успешно работать при переменном напряжении 400 в; это соответствует значению $E_{\text{раб}} = 67 \text{ кВ/мм}$. Столь высокое значение $E_{\text{раб}}$ позволяет не только компенсировать снижение ϵ при переходе от пропитанной бумаги к неполярной пленке ($\epsilon \approx 2,2$), но и по-

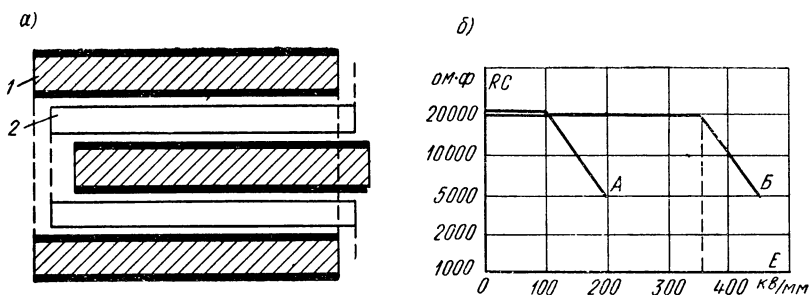


Рис. 41. Конденсаторы типа МКВ: а — схема устройства конденсатора 1 — двусторонне металлизированная бумага; 2 — полипропиленовая пленка; б — зависимость постоянной времени от напряженности поля; А — обычный металлопленочный конденсатор, В — конденсатор МКВ

лучить значительный выигрыш в объеме, обусловленный также и снижением перегрева в связи с малым углом потерь конденсатора ($\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$). По данным Бэна, удельная реактивная мощность конденсаторов типа МКВ примерно в 2 раза выше, чем у аналогичных бумажных конденсаторов. При использовании конденсаторов для кратковременной работы (при пуске электродвигателей) допустимо напряжение 550 в (50 гц) при температуре 85°C ; при длительной работе допускается 380 в при 55°C . При номинальной мощности конденсаторов 5—16 квар удельная мощность составляет около 4—4,8 квар/дм³.

По данным Черча и Красуцкого в полипропиленовых конденсаторах, пропитанных трихлордифенилом, можно допускать $E_{\text{раб}} = 50 \text{ кВ/мм}$ (50 гц).

Таким образом, в ряде стран полипропиленовая пленка начинает заменять бумагу в конденсаторах переменного напряжения небольшой реактивной мощности. Имеется также положительный опыт по использованию полипропиленовой пленки в комбинации с бумагой в силовых конденсаторах переменного напряжения большой мощности. Этот вопрос будет рассмотрен нами ниже (§ 23).

§ 12. Пленки из политетрафторэтилена и из фторированного сополимера этилена и пропилена

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) известен в СССР под названием «фторопласт-4» и в США под названием «тефлон». Исходный продукт для получения ПТФЭ — тетрафторэтилен $\text{CF}_2=\text{CF}_2$ — представляет собой нетоксичный газ без цвета и запаха с температурой кипения $76,3^\circ\text{C}$, температурой замерзания — $142,5^\circ\text{C}$, критической температурой — $33,3^\circ\text{C}$ и критическим давлением $37,8$ ат. Удельный вес в жидком состоянии при -40°C составляет 1,368.

Реакция полимеризации, при которой образуется высокомолекулярный продукт ПТФЭ:



протекает при умеренном давлении в присутствии инициаторов; вследствие экзотермичности этой реакции надо обеспечивать быстрый отвод тепла и поддерживать постоянный температурный режим. Поэтому полимеризацию тетрафторэтилена ведут в эмульсиях.

Особенностью ПТФЭ является его принадлежность к чисто фтороуглеродистым соединениям; в молекулах ПТФЭ цепочка атомов углерода связана только с атомами фтора. Связь углерода с фтором в таком соединении, как ПТФЭ, является одной из наиболее прочных связей в органических соединениях; энергия связи $\text{C}-\text{F}$ составляет 107 ккал/моль; для примера укажем, что энергия такой прочной связи, как $\text{Si}-\text{O}$, равна 89 ккал/моль.

Кроме того, размеры атомов фтора как раз таковы, чтобы образовать плотный слой поверх цепочки атомов углерода; этот слой образует прочную оболочку, защищающую углеродную цепочку от воздействия химических реагентов. Это объясняет высокую химическую стойкость ПТФЭ и его необычно высокую для органического соединения нагревостойкость. По этой же причине ПТФЭ практически негигроскопичен и исключительно влагостоек.

Простая линейная форма молекул ПТФЭ и относительно большая энергия взаимодействия между атомами фтора соседних молекул (порядка 2 ккал/моль) обуславливает его склонность к кристаллизации и повышенное содержание кристаллической фазы в сравнении с таким полимером, как, например, полиэтилен. Температура стеклования ПТФЭ так же низка, как у полиэтилена (около -80°C , но температура плавления примерно на 200°C выше и составляет $320-327^\circ\text{C}$. Сочетание некоторого количества аморфной фазы с высокоплавкой кристал-

лической фазой дает ПТФЭ, подобно полиэтилену, известную гибкость и эластичность.

Надо отметить, что ПТФЭ после расплавления не течет, как большинство линейных полимеров. При повышении температуры выше 327°C кристаллическая структура этого вещества разрушается и он переходит в аморфный прозрачный гель, не растекаясь при этом. Большая вязкость ПТФЭ в расплавленном состоянии обусловлена его очень высоким молекулярным весом 140 000—500 000 и выше. Это исключает возможность применения литья под давлением для изготовления изделий из порошка ПТФЭ и требует использования более сложной технологии: сухой прессовки при комнатной температуре и спекания при температуре, превышающей температуру образования геля.

При прессовке порошок сжимается примерно до $\frac{1}{4}$ своего начального объема. Запекание проводится при температуре 370°C в течение нескольких часов; наличие внутреннего отверстия в пресс-форме позволяет осуществить равномерный нагрев внутри и снаружи отформированного цилиндра.

Обычным методом получения пленки ПТФЭ является снятие на станке широкой стружки с вращающейся цилиндрической заготовки, изготовленной описанным здесь способом; с последующим вальцеванием пленки для снижения ее толщины до нужного значения. При этом пленка делается ориентированной, что позволяет производить запекание намотанных из нее конденсаторных секций, так же как и в случае полистирольной пленки, но при значительно более высоких температурах.

Этим методом удастся получать толщину пленки до 6 *мкм*, но чаще применяют более толстые пленки, так как при малых толщинах число слабых мест в пленке при такой технологии ее получения очень велико.

ПТФЭ («фторопласт-4») представляет собой типичный непolarный диэлектрик; его диэлектрическая проницаемость составляет около 2,0 и не зависит от частоты в широких пределах ее изменения.

По данным Эрлиха, в области температур до 200°C величина ϵ изменяется почти линейно с температурным коэффициентом порядка $-223 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; при дальнейшем повышении температуры снижение ϵ усиливается; среднее значение ТКЭ в интервале $25-300^{\circ}\text{C}$ составляет $-310 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По данным этого исследователя, в пределах температуры от 25 до 314°C и частоты от 100 гц до 100 кгц величина $\text{tg } \delta$ ПТФЭ лежит ниже $2 \cdot 10^{-4}$.

При комнатной температуре, по данным Хиппеля, при частоте порядка 10^9 гц наблюдается небольшой максимум. Г. П. Михайлов, ссылаясь на других американских авторов, отмечал, что данный максимум должен лежать в пределах 10^7-10^8 гц . Исследуя зависимость угла потерь ПТФЭ от температуры, Михайлов с сотрудниками обнаружил небольшой температурный макси-

мум $\operatorname{tg} \delta$, лежащий в области низких температур, но смещающийся к нулевой температуре при повышении частоты. Для «закаленного» образца (нагретого до 400°C и быстро охлажденного в воде до 20°C) максимум $\operatorname{tg} \delta$ без заметного смещения по температуре возрос по абсолютной величине примерно в 2 раза. Поскольку в закаленном образце увеличено содержание аморфной фазы, можно думать, что наблюдаемые релаксационные потери происходят в аморфных областях ПТФЭ. Эти потери, вероятно, вызваны наличием каких-то полярных примесей в полимерной цепи ПТФЭ.

Исследования Н. А. Родионовой показали, что при длительной выдержке в условиях влажности 98% прибавь в весе для образцов ПТФЭ не наблюдается и $\operatorname{tg} \delta$ остается практически неизменным, сохраняя в пределах частоты 10^2 — 10^8 *гц* величину порядка 1 — $2 \cdot 10^{-4}$. В этой работе наличие небольшого максимума $\operatorname{tg} \delta$ обнаружено около 10^7 *гц*. Практически нулевая гигроскопичность ПТФЭ и его несмачиваемость водой делает электрические свойства данного диэлектрика весьма устойчивыми в условиях высокой влажности и после выдержки в воде. Коэффициент влагопроницаемости для ПТФЭ так же мал, как и для полиэтилена, около 2 — $3 \cdot 10^{-10}$ *г/см·ч·торр*, а коэффициент диффузии в три раза меньше ($D = 3 \cdot 10^{-6}$ *см²/ч*).

Удельное сопротивление ПТФЭ, как объемное, так и поверхностное, весьма велико и с трудом поддается измерению. Обычно указываются значения выше 10^{15} — 10^{16} *ом·см* или *ом*; фактические значения на несколько порядков больше.

Для неэлектрических свойств ПТФЭ можно привести такие значения:

Плотность	2,1—2,2 <i>г/см³</i>
Коэффициент линейного расширения при 25—60° С	55·10 ⁻⁶ <i>град⁻¹</i>
Теплопроводность	0,00243 <i>вт/см·град</i>
Удельная теплоемкость	0,248 <i>кал/град</i>
Показатель преломления	$n = 1,37$ — $1,38$

Механическая прочность ПТФЭ зависит от степени ориентации. Э. И. Барг указывает, что для неориентированного ПТФЭ временное сопротивление разрыву равно 140 — 160 *кг/см²*, а для ориентированного 1000 — 1200 *кг/см²*; удлинение равно 300 — 400% . Ш. Т. Абзианидзе при испытании пленок ПТФЭ получил среднее значение 680 *кг/см²* при удлинении 61% . В одной из американских работ приводятся значения $\sigma_p = 105$ — 175 *кг/см²* и удлинение 100 — 200% ; Штегер дает значения 125 *кг/см²* и 300 — 400% .

Описанный выше метод получения пленки из ПТФЭ путем строгания и вальцовки дает большую неоднородность электрической прочности особенно при малых толщинах. В ТУ на такую пленку даже не оговаривается определение пробивного

напряжения в один слой, а указываются значения, получаемые при испытании пленки в два слоя. Даже при таком испытании и электродах небольшой площади, могут наблюдаться случаи пробоя при весьма низком напряжении или даже короткое замыкание электродов до подачи напряжения. При этом средние значения пробивной напряженности при постоянном напряжении получаются весьма высокими, примерно 250—500 кВ/мм (рис. 42, а), по данным Л. А. Гавартина. При испытании ряда партий пленки ПТФЭ в один слой при переменном напряжении Абзианидзе получил разброс значений от 30—40 до 60—

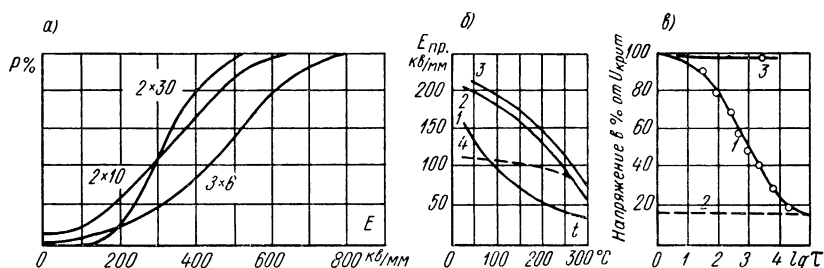


Рис. 42. Электрическая прочность пленки из политетрафторэтилена: а — разброс $E_{пр}$ при постоянном напряжении (у кривых указаны толщины диэлектрика в микронах); б — зависимость $E_{пр}$ при частоте 50 гц (амплитуда) от температуры при разном числе слоев 1 — один слой; 2 — два слоя; 3 — от трех до семи слоев; 4 — один слой, по данным Абзианидзе;

в — зависимость относительного значения пробивного напряжения от времени воздействия

1 — переменное напряжение; 2 — граница ионизации; 3 — постоянное напряжение

140 кВ/мм. Такие же значения указываются и в одной из американских работ.

Зависимость средних амплитудных значений пробивной напряженности при переменном токе (50 гц) при различном числе слоев пленки ПТФЭ от температуры, по данным И. Е. Балыгина и К. С. Поровского, показана на рис. 42, б. Для однослойных образцов отмечено резкое снижение $E_{пр}$ с температурой: более чем в 3 раза при переходе от 25 к 200°С. Эти данные противоречат результатам Абзианидзе, которые показаны для однослойных образцов пунктирной кривой. В американской литературе можно найти указания, что пробивная напряженность ПТФЭ («тефлон») практически не изменяется в пределах изменения температуры от 25 до 200°С. При частоте $7 \cdot 10^5$ гц и температуре 25°С Балыгин и Поровский нашли для пленок ПТФЭ (при их испытании в различных жидких средах для ослабления краевого эффекта) значения $E_{пр} = 26—47$ кВ/мм. Значения числа слоев и толщины пленки не указываются.

Все приведенные здесь данные относятся к кратковременному действию напряжения. При длительном воздействии постоянного напряжения электрическая прочность пленки ПТФЭ снижается относительно медленно, тогда как при переменном напряжении технической частоты пробивное напряжение быстро падает, приближаясь к значению напряжения, соответствующего началу ионизации; это наглядно показывает рис. 42, в, взятый из работы Абзианидзе.

Резкое снижение электрической прочности ПТФЭ при длительном действии переменного напряжения обусловлено низкой короностойкостью этого материала. В тех же условиях, когда для полистирола или полиэтилена при воздействии короны срок жизни образцов составляет десятки часов, для ПТФЭ он снижается до нескольких часов. Высокая химическая стойкость ПТФЭ обеспечивает повышенную устойчивость его к активным продуктам разложения воздуха в условиях короны — озону и окислам азота. Поэтому для ПТФЭ оказывается опасным не воздействие этих продуктов, а непосредственное воздействие разрядов. По мнению М. М. Михайлова и Лю Цзы-юй, малую стойкость ПТФЭ к разрядам можно объяснить большим сродством галоидов, в данном случае фтора, с электронами. При захвате электрона образуются ионы фтора, что связано с освобождением значительных количеств энергии, способствующих быстрому разрушению ПТФЭ.

При разработке конденсаторов переменного напряжения из пленки ПТФЭ надо уделять особое внимание вопросу об исключении возможности развития в них ионизационных процессов еще в большей степени, чем при использовании пленок из других неполярных полимеров.

Заметное повышение $E_{пр}$ можно получить, радикально изменяя технологию изготовления пленки. Для этой цели применяется метод отливки суспензии ПТФЭ в жидкой среде на движущуюся гладкую ленту с последующей сушкой и спеканием полученного тонкого слоя. Нанося последовательно несколько слоев, можно обеспечивать перекрытие слабых мест и значительное повышение однородности пленки. По данным Мистича, при толщине такой пленки, равной 25 мкм, можно получить значение электрической прочности в 5—10 раз выше, чем при обычном методе изготовления пленки. Эти данные, очевидно, относятся к испытанию пленки в один слой, когда особенно сильно сказывается влияние слабых мест. Недостатком этого метода является то, что при отсутствии дополнительной обработки пленка получается неориентированной или очень слабо ориентированной; это исключает возможность успешного проведения операции запекания намотанных секций и затрудняет получение достаточной стабильности емкости.

В США, кроме чисто политетрафторэтиленовой пленки, изготавливают также пленочные материалы, представляющие собой

сочетание ПТФЭ и стекловолокна. Такие пленки могут быть получены путем пропитки стеклоленты суспензией ПТФЭ или путем введения стеклянного микро волокна в качестве наполнителя в пленку ПТФЭ, получаемую отливкой из суспензии. Влияние введения стекловолокна в тефлоновую пленку на температурную зависимость емкости, по данным Мистича, показано на рис. 43. Комбинация из стекловолокна с тефлоном (ПТФЭ) дает меньшее изменение емкости с температурой, причем ТКЭ меняет свой знак и приобретает положительное значение. При пропитке конденсаторов полисилоксаном это различие практически исчезает.

Тонкие пленки ПТФЭ, нанесенные из суспензии на алюминиевую фольгу, могут применяться вместе с этой фольгой, используемой в качестве одной из обкладок конденсатора. В этом случае удается получать толщины пленки до 1,5 мкм. Однако этот вопрос мы рассмотрим ниже, так как такой тип конденсатора уже может быть отнесен к тонкопленочным конденсаторам (§ 28).

ПТФЭ, обладая высокой нагревостойкостью и влагостойкостью, является дорогостоящим материалом как в наших условиях, так и за рубежом. Так, по французским данным (1965 г.), если стоимость полистирола всего лишь на 10% превышала стоимость пропитанной бумаги, то стоимость ПТФЭ была выше стоимости бумаги в 24 раза. Это обстоятельство весьма ограничивает широкое применение ПТФЭ в конденсаторостроении.

Кроме того, этот материал мало технологичен; в частности, долгое время считалось, что он, в принципе, не поддается металлизации. Впоследствии были предложены методы химической обработки его поверхности, для того чтобы обеспечить достаточно прочное сцепление тонкого металлического слоя, наносимого испарением в вакууме, с поверхностью ПТФЭ. Так, например, согласно японскому патенту¹ предлагалось помещать

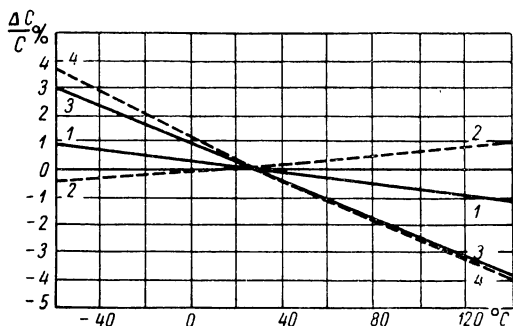


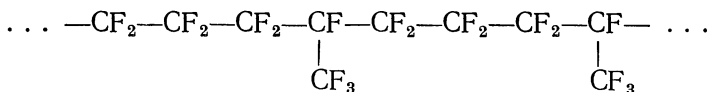
Рис. 43. Влияние введения стеклянного волокна в тефлоновую пленку на температурную зависимость емкости пленочных конденсаторов
 1 — непропитанный тефлон, ТКЭ = $-110 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;
 2 — непропитанный тефлон со стекловолокном, ТКЭ = $+55 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;
 3 — пропитанный тефлон, ТКЭ = $-350 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;
 4 — пропитанный тефлон со стекловолокном, ТКЭ = $-375 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$

¹ Японск. пат., № 3431, 2.05.1958, Ясуда Тосиро, Симомура Масацу.

пленку ПТФЭ (10—400 мкм) перед ее металлизацией цинком или алюминием в 0,1—10% раствор металлического натрия или калия в аммиаке на 1—10 сек.

Предлагаемый метод химической обработки поверхности ПТФЭ неудобен тем, что связан с использованием относительно опасных реагентов. Кроме того, электрические свойства пленки ПТФЭ после такой химической обработки, особенно ее поверхностное сопротивление, заметно ухудшается. Лучшие результаты дает метод обработки газовым разрядом поверхности пленки перед ее металлизацией, обеспечивший возможность изготовления фторопластовых металлизированных конденсаторов. Такой же метод применяется для обработки поверхности полипропиленовой пленки перед ее металлизацией.

Как показал опыт США, на основе фторорганических соединений можно получить значительно более технологичный материал за счет относительно небольшого снижения нагревостойкости. Этот материал, получивший название «тефлон-*FEP*», представляет собой фторированный сополимер этилена и пропилена, полимерная молекула которого имеет строение:



Нагревостойкость его на 20—25° С ниже, чем у ПТФЭ, но все же достигает 200° С, по данным Тэрнера; плотность этого материала 2,15 г/см³; $\epsilon=2,1$; $\text{tg } \delta=2 \cdot 10^{-4}$ (60 гц); $\rho_{\text{об}}$ выше 10^{17} ом·см и $E_{\text{пр}}=160$ кв/мм (также по данным Тэрнера). В работе Бойера (Швейцария, 1962.) указана длительная нагревостойкость 200° С и кратковременная — 275° С; $\epsilon=2$ —2,2 и $\text{tg } \delta=2$ — $8 \cdot 10^{-4}$ в пределах от 50 гц до 10 Мгц.

По данным Форстнера (ФРГ, 1964 г.), сополимер этого типа, называемый «тефлон-100» (по-видимому, то же, что «*FEP*»), в отличие от ПТФЭ может выдавливаться с помощью червячных прессов, но сохраняет основные преимущества ПТФЭ: высокую нагрево- и химостойкость, гибкость, негорючесть и влагостойкость. Интервал рабочей температуры этот автор указывает равным —270÷+250° С. Можно думать, что в конденсаторах для пленки из этого сополимера рабочую температуру придется ограничивать значением +180° С (эту цифру, в частности, указывают Карлтон и Шен для пленки толщиной 12,5 мкм).

В отличие от ПТФЭ сополимер легко поддается металлизации, что являлось одним из его существенных преимуществ при использовании в конденсаторостроении, пока не была показана принципиальная возможность металлизации пленки ПТФЭ. Этот материал, по-видимому, нашел себе известное применение в конденсаторном производстве США, но в литературе и в рекламах, насколько нам известно, подробных сведений об этом не появлялось.

§ 13. Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена (фторопластовые)

Применение пленки ПТФЭ для изготовления конденсаторов позволило сделать качественный скачок в деле повышения нагревостойкости намотанных конденсаторов, увеличив верхний предел рабочей температуры, достигнутый для бумажных конденсаторов, практически в 2 раза. Однако это было достигнуто за счет резкого повышения цены конденсаторов из-за высокой стоимости пленки ПТФЭ. Поэтому такие конденсаторы применяют сейчас преимущественно в специальной аппаратуре, когда требуется увеличить рабочую температуру до верхнего предела, гарантируемого для пленки ПТФЭ, независимо от требования к электрическим характеристикам или когда требуется конденсатор, по характеристикам близкий к полистирольному, но с более высокой рабочей температурой, хотя бы и не достигающей предельного значения, характерного для ПТФЭ. Еще недавно конденсаторы такого типа изготавливались только в СССР и США. Теперь производство их постепенно осваивается и в других странах, часто на импортной пленке.

За последние годы в СССР освоен ряд типов пленочных фторопластовых конденсаторов: ФТ — фторопластовые термостойкие, ФГТИ — фторопластовые герметизированные в изолированном корпусе, ФД — фторопластовые дозиметрические (см. § 7) и ФТЧ — фторопластовые частотные.

При намотке фторопластовых конденсаторов, так же как и полиэтиленовых, приходится сталкиваться с эластичностью пленки, отсутствующей у полистирола, что вносит некоторые осложнения в намотку. Так же как и при намотке конденсаторов из других пленок с высоким поверхностным сопротивлением, имеется опасность поверхностной электризации пленки и способности ее захватывать частички пыли из окружающего воздуха. При использовании в качестве обкладок алюминиевой фольги, с учетом наличия воздушных зазоров, Мистич рекомендует принимать эффективное значение ϵ для конденсаторов из пленки ПТФЭ равным 1,7.

Как указано выше, теперь стала возможной и металлизация пленки ПТФЭ после ее предварительной обработки. В связи с этим в СССР разработана новая серия металлизированных фторопластовых конденсаторов типа К72-9. О выпуске металлизированных тефлоновых конденсаторов сообщалось также в рекламе некоторых американских фирм.

После намотки секций, так же как и в случае полистирольных конденсаторов, проводится операция запекания для стабилизации емкости, но при более высоких температурах (примерно 200—250°С). После запекания полезно дать конденсаторам несколько температурных циклов при крайних значениях рабочей температуры, что значительно улучшит стабильность емкости.

В конструкции фторопластовых конденсаторов, учитывая высокий предел их рабочей температуры, следует избегать пайки, особенно мягкими припоями; в этих случаях следует прибегать к сварке. Высокая влагостойкость пленки ПТФЭ, в принципе, позволяет отказаться от герметизации конденсаторов, так как их электрические свойства должны быть достаточно устойчивы в условиях высокой влажности без добавочной влагозащиты. Однако обычное конструктивное оформление этих конденсаторов предусматривает использование металлического корпуса, в основном, для защиты мягкой и эластичной пленки от механических повреждений. Часто в этом случае применяют алюминиевый трубчатый корпус с торцевыми шайбами из листового фторопласта, закрепленными путем закатки краев корпуса (рис. 44, а).

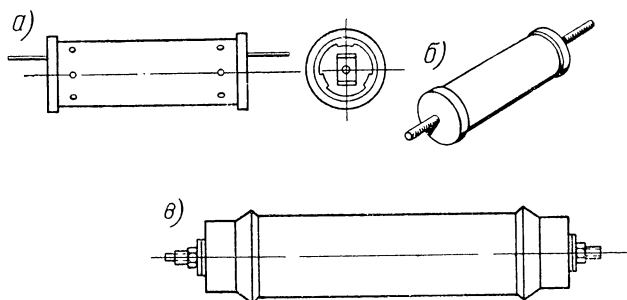


Рис. 44. Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена: а — тип ФТ; б — американский тип TSG; в — тип ФГТИ

В практике США применяют также стеклянные корпуса в виде трубок с металлизированными торцами, на которых монтируются металлические торцевые колпачки с выводными болтиками (рис. 44, б). Эта конструкция обычно применяется для конденсаторов с повышенным напряжением, пропитанных полисилоксановой жидкостью. В СССР аналогичная конструкция выполняется с применением керамических трубок, армированных на торцах переходными коваровыми кольцами, соединяемыми с керамическим корпусом через слой стекла (рис. 44, в); вместо пропитки жидкостью производится заполнение конденсатора сжатым азотом. Конденсаторы низкого напряжения большой емкости собирают также иногда из плоских секций в герметизированных корпусах прямоугольной формы с керамическими изоляторами.

В связи с высокой влагостойкостью ПТФЭ даже для негерметизированных конденсаторов гарантируется работа при относительной влажности 98%, за исключением тех случаев, когда требуется очень высокое сопротивление изоляции (дозиметрические конденсаторы).

Нижний предел рабочей температуры для фторопластовых конденсаторов в соответствии с требованиями заказчиков обычно оговаривается равным $-50 \div -60^\circ\text{C}$. По-видимому, при необходимости его можно снизить и до $-70 \div -80^\circ\text{C}$. Верхний предел как в СССР, так и за рубежом обычно указан равным 200°C для конденсаторов низкого напряжения и 150°C — для конденсаторов высокого напряжения. Отдельные зарубежные фирмы иногда повышают эти значения соответственно до 250 и 200°C , но при этом оговаривается снижение рабочего напря-

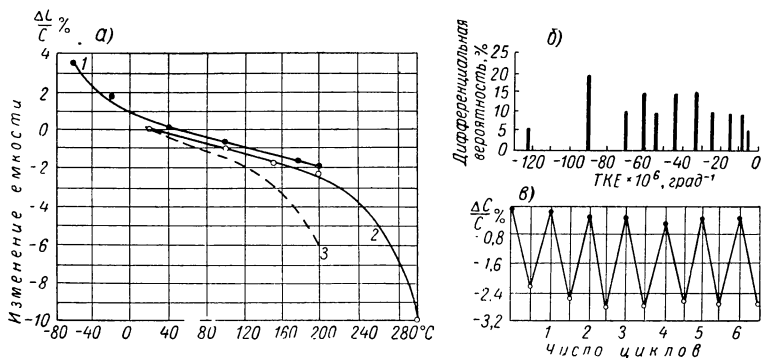


Рис. 45. Стабильность емкости политетрафторэтиленовых конденсаторов: а — зависимость емкости от температуры

1 и 2 — для фторопластовых конденсаторов; 3 — тефлоновый конденсатор; б — разброс значений ТКЕ для партии фторопластовых конденсаторов; в — изменения емкости фторопластового конденсатора при воздействии температурных циклов $20/200^\circ\text{C}$: $\circ$ — измерение при 20°C , $\bullet$ — при 200°C

жения. Для негерметизированных конденсаторов некоторые фирмы указывают верхний предел температуры только до $+85^\circ\text{C}$.

Номинальная емкость фторопластовых конденсаторов лежит в пределах от нескольких сотен пикофард до $0,1\text{—}1$ мкф. Допускаемое отклонение емкости от номинала обычно увеличено в сравнении с полистирольными конденсаторами; в СССР обычный допуск ± 10 и $\pm 20\%$; в отдельных случаях до $\pm 5\%$. Зависимость емкости конденсаторов рассматриваемого типа от температуры показана на рис. 45, а, по данным М. М. Аснина и Е. И. Михайловой (кривые 1 и 2) и по данным Козенса (кривая 3). Для отечественных образцов эта зависимость близка к прямолинейной в интервале $20\text{—}200^\circ\text{C}$; в этом интервале $\text{ТКЕ} = -(110\text{—}120) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; для кривой 3 в интервале $20\text{—}120^\circ\text{C}$ получено значение $\text{ТКЕ} = -200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Расширение интервала температуры в сторону ее повышения дает

резкое отклонение от прямолинейности и заметное возрастание ТКЕ.

В зарубежных рекламных данных можно найти самые различные значения ТКЕ для тефлоновых конденсаторов, начиная от -50 до $-400 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Наши нормы обычно указывают значение не выше $-200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, как и для полистирольных конденсаторов. При тщательном изготовлении конденсаторов с обкладками из фольги разброс величины ТКЕ может быть не очень большим, как показывает гистограмма на рис. 45, б, по данным Г. Р. Демиденко, Е. Б. Кравчинской и М. К. Чесновой. В данном случае значения ТКЕ уложились в пределы от 0 до $-150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Иногда наблюдаются даже небольшие положительные значения ТКЕ. Поскольку ϵ у ПТФЭ заметно снижается при нагревании, близкие к нулю или даже положительные значения ТКЕ могут быть получены только изменением геометрических размеров, вызванным некоторым уменьшением толщины пленки за счет ее эластичности при возникновении в конденсаторе сжимающих усилий в процессе его нагрева.

Для металлизированных конденсаторов из пленки ПТФЭ обычно наблюдается более сильное снижение емкости при нагреве, чем у фольговых конденсаторов; поэтому для них установлена расширенная норма на величину ТКЕ: до $-350 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Стабильность емкости во времени и при воздействии термических циклов в случае фторопластовых конденсаторов несколько хуже, чем для полистирольных; однако, как показывают данные Аснина и Михайловой на рис. 45, в, при правильном режиме запекания можно получать относительно хорошую стабильность; после первых двух циклов изменения емкости при колебаниях температуры стабилизируются и результаты измерения как при 20°C , так и при 200°C воспроизводятся с точностью порядка нескольких десятых процента. По величине коэффициента абсорбции фторопластовые конденсаторы стоят наряду с полистирольными (табл. 6); в среднем для них можно даже получать несколько меньшие значения k_a , чем для полистирольных.

Угол потерь конденсаторов из пленки ПТФЭ весьма мал в тех случаях, когда его величина определяется потерями в диэлектрике. В рекламных данных зарубежных фирм обычно указываются значения $\text{tg } \delta = 2-3 \cdot 10^{-4}$; одна из американских фирм, оговаривая условия измерения (частоту и температуру), приводит более высокие значения: $5 \cdot 10^{-4}$ при 70°C и $10 \cdot 10^{-4}$ при 150°C (1 Мгц), отмечая, что значения $2-3 \cdot 10^{-4}$ относятся к комнатной температуре и частоте 60 гц . Отечественные ТУ обычно оговаривают значения не более $10 \cdot 10^{-4}$ при комнатной и $15 \cdot 10^{-4}$ при максимальной рабочей температуре, но для конденсаторов типа ФТЧ снижают эти величины соответственно до

$5 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-4}$. Фактические величины $\operatorname{tg} \delta$ лежат заметно ниже этих предельных значений.

С повышением частоты начинается возрастание угла потерь за счет роста потерь в металлических частях конденсатора, как и в других конденсаторах с диэлектриком из неполярной пленки (рис. 36, з). Уменьшение потерь в металле может быть получено применением намотки с выступающей фольгой, уменьшением ширины фольги и тщательным контактированием, снижающим потери в переходных контактах.

Постоянная времени фторопластовых конденсаторов весьма велика, так же как полистирольных. При комнатной температуре для тщательно изготовленных конденсаторов постоянная времени составляет 10^5 — 10^6 сек, при верхнем пределе рабочей температуры она лежит выше 100 сек, а во многих случаях даже выше 1000 сек. Металлизация ухудшает постоянную времени конденсаторов из пленки ПТФЭ, но все же и для металлизированных конденсаторов удается получать значения выше 100 сек при 200°C . Пропитка также ухудшает постоянную времени.

При постоянном напряжении ПТФЭ устойчив и допускает работу при повышенных значениях напряженности поля, более высоких, чем для полистирола. По данным Мистича, для многослойного диэлектрика при температуре 125°C допустимо значение $E_{\text{раб}} = 40$ кВ/мм. Аснин и Михайлова для небольших емкостей с многослойным диэлектриком дают еще более высокие значения — до 70 кВ/мм при 150°C . Применение обычной пленки ПТФЭ в один слой с обкладками из фольги практически невозможно из-за наличия в ней большого числа слабых мест; Мистич оговаривает такую возможность, но лишь для пленки, полученной из суспензии или содержащей наполнитель в виде стекловолокна. При относительно больших емкостях даже два слоя пленки не обеспечивают достаточной надежности и желательно брать пленку в три слоя. При небольших напряжениях это дает заметное снижение $E_{\text{раб}}$ по сравнению с указанными выше цифрами. При толщине диэлектрика 3×5 мкм и напряжении 200 в имеем всего лишь 13,3 кВ/мм, при толщине 3×10 мкм и 600 в — 20 кВ/мм и при толщине 4×10 мкм и 1000 в — 25 кВ/мм. Эти цифры соответствуют емкостям 0,25—0,5 мкф и рабочей температуре 200°C .

При высоком напряжении постоянного тока и наполнении сжатым азотом при емкостях 0,05—0,1 мкф конденсаторы собирают из последовательно соединяемых секций из расчета до 2—5 кВ на секцию. При диэлектрике в секции 4×30 мкм и рабочей температуре 150°C , по-видимому, допустима напряженность поля до 40—45 кВ/мм. В данном случае последовательное соединение секций позволяет уменьшить толщину диэлектрика в секции до оптимального значения, соответствующего наивыгоднейшей кратковременной прочности, и получить уменьшение ширины закраины, которая рассчитывается на рабочее напря-

жение секции, а не на полное рабочее напряжение конденсатора. При цилиндрической форме конденсатора удобно наматывать секции одну за другой на одну и ту же оправку, обрывая в нужных местах ленты фольги, чтобы разъединить секции друг от друга. При этом надо использовать такую схему соединений, которая обеспечит наименьшую индуктивность конденсатора (рис. 14).

Для конденсатора, рассчитанного на высокое напряжение переменного тока, необходимо, чтобы рабочее напряжение, приходящееся на одну секцию, лежало бы ниже ионизирующего напряжения, соответствующего толщине диэлектрика в секции.

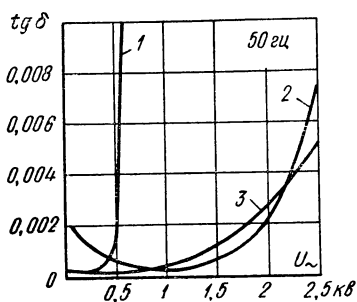


Рис. 46. Зависимость угла потерь фторопластовых конденсаторов от напряжения

1 — секция на воздухе; 2 — секция в жидком диэлектрике; 3 — секция в сжатом азоте (5 ат)

При этом увеличение толщины диэлектрика не дает существенного увеличения напряжения начала ионизации, и значения ионизирующей напряженности снижаются с толщиной.

Резкое повышение ионизирующего напряжения $U_{\text{и}}$ возможно путем пропитки конденсаторов полисилоксановой жидкостью или заполнения сжатым газом (рис. 46). Применение сжатого газа дает ряд преимуществ: уменьшение $\text{tg } \delta$ в связи с отсутствием междуслойной поляризации, присущей пропитанному диэлектрику, отсутствие необходимости иметь компенсацию расширения жидкости при нагреве, отсут-

ствие выделения окиси кремния (как при использовании полисилоксана) в местах сварки, затрудняющей последнюю и т. п. Для предупреждения возможности ионизации при переменном и импульсном напряжениях допустимые значения напряжения этого вида для конденсаторов типа ФГТИ заметно снижены по сравнению с номинальным постоянным напряжением. Напряжение на одну секцию во фторопластовых конденсаторах, заполненных сжатым азотом, при частоте 50 Гц обычно берут примерно 1 кВ.

Металлизированные конденсаторы типа К72-9 изготавливают из одной металлизированной и одной неметаллизированной пленки толщиной по 10 мкм, т. е. при суммарной толщине диэлектрика 2×10 мкм. Номинальное постоянное напряжение для этой серии конденсаторов установлено в пределах от 200 до 500 в, повышаясь по мере снижения номинальной емкости. Таким образом, для этой серии величина $E_{\text{раб}}$ изменяется в пределах от 10 до 25 кВ/мм. Испытательное напряжение для фторопластовых конденсаторов обычно берется равным $1,5 U_{\text{ном}}$, но для некоторых типов низкого напряжения повышается до $2 U_{\text{ном}}$.

Повышенные значения $E_{\text{раб}}$ позволяют получить выигрыш

в размерах по сравнению с полистирольными конденсаторами, но объем бумажных конденсаторов благодаря более высокой ϵ и меньшей толщине диэлектрика при небольших напряжениях оказывается меньше, чем у фторопластовых.

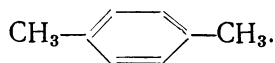
Однако надо иметь в виду, что для бумажных конденсаторов рабочая температура составляет 70°C , а для ФГТИ — 150°C . При повышении рабочей температуры бумажных конденсаторов до 100°C приходится снижать для них $E_{\text{раб}}$, и их объем заметно увеличивается, ослабляя их преимущество по сравнению с конденсаторами из пленки ПТФЭ, даже при больших емкостях.

Резкое различие в стоимости фторопластовых и бумажных конденсаторов позволяет ставить вопрос о применении фторопластового конденсатора взамен бумажного только в тех случаях, когда требуется обеспечить при заданных номинальных данных резкое повышение рабочей температуры, которое уже не может дать пропитанная бумага, или получить такое улучшение угла потерь или коэффициента абсорбции, которое бумага не может обеспечить, будучи по своей природе полярным материалом. Однако во втором случае обычным заменителем бумаги является полистирол, такой же, как и фторопласт, неполярный диэлектрик (по данным Лампье, 1965 г., конденсаторы из пленки ПТФЭ в 5 раз дороже полистирольных); применение фторопласта и в этом случае может стать необходимым только тогда, когда нагревостойкость полистирола окажется недостаточной или решающую роль будет играть сниженный объем фторопластового конденсатора в сравнении с полистирольным. Надо учесть, что теперь появился еще один новый неполярный материал — полипропилен, который может быть использован вместо фторопласта, если малый угол потерь и другие преимущества неполярной пленки надо обеспечить при температуре 100°C .

Г. НОВЫЕ НЕПОЛЯРНЫЕ СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ С ПОВЫШЕННОЙ НАГРЕВОСТОЙКОСТЬЮ

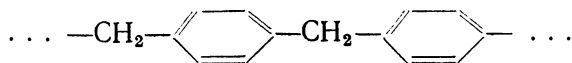
§ 14. Полипараксилилен и полифениленоксид

В 1964 г. появилось сообщение, что фирмой «Юнион Карбид Корпорейшн» (США) разработан новый полимерный диэлектрик для конденсаторов, получивший название «Парилен». Тонкие слои этого диэлектрика могут быть получены на металлической фольге путем пиролитического разложения паров параксилола C_8H_{10} , молекула которого имеет строение:



Параксиллол имеет удельный вес 0,861, точку плавления $+13^{\circ}\text{C}$ и температуру кипения $+138^{\circ}\text{C}$. В процессе пиролиза

на металлической фольге образуется тонкий равномерный слой полимера, представляющего собой полипараксилилен и имеющего строение:



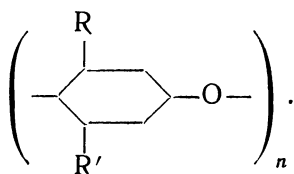
Можно получать также тонкую пленку на фольге путем испарения в вакууме заранее полученного твердого полимера. Скорость осаждения пленки в зависимости от режима составляет 0,5—25 *мкм/мин.* Сначала сообщалось о нанесении слоев толщиной 100—1000 Å, но затем появились указания о том, что оптимальная толщина слоя лежит в пределах от 0,25 до 100 *мкм.*

Полипараксилилен (ППК) представляет собой неполярный полимер с плотностью 1,12 *г/см³* и высокими электрическими свойствами: $\epsilon=2,7$ и практически неизменна в широком интервале частот от 60 *гц* до 1 *Мгц*; с повышением температуры ϵ снижается, как и у других неполярных полимеров, но относительно слабо; в интервале температур от -185 до $+170^\circ\text{C}$ величина ТКЕ конденсаторов с диэлектриком из ППК составляет около $-100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Угол потерь полимера весьма мал: $\text{tg } \delta < 5 \cdot 10^{-4}$ и практически не изменяется в пределах температуры от -185 до $+170^\circ\text{C}$. При частоте 1 *кгц* и 25°C было измерено значение $\text{tg } \delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$; при повышении частоты до 10 *Мгц* можно было заметить небольшое увеличение $\text{tg } \delta$. Величина $\rho_{\text{об}}$ при 25°C выше $10^{18} \text{ ом} \cdot \text{см}$ и при 170° составляет около $2,5 \cdot 10^{14} \text{ ом} \cdot \text{см}$. При толщине пленки 2 *мкм* и испытании между фольгой, на которую нанесена пленка, и ртутным электродом было получено значение $E_{\text{пр}} = 320 \text{ кв/мм}$. По другим данным $E_{\text{пр}}$ для ППК равно 265 *кв/мм*. Температура плавления пленки высока и составляет 400°C ; были высказаны надежды на возможность повышения рабочей температуры конденсатора до 265°C , но при том условии, что он будет надежно защищен от доступа кислорода воздуха соответствующей герметизацией. Отмечается, что защиту пленки ППК от окисления надо обеспечивать, уже начиная от 125°C . Особо отмечается высокая устойчивость пленки при низких температурах вплоть до 3,5° К, когда она еще сохраняет пластичность. При отсутствии доступа кислорода пленка ППК устойчива к действию радиации и не меняет своих электрических и физических свойств после воздействия дозы 10^8 рад .

Указанные сведения относятся к полимеру марки «Парилен-*N*». Кроме него, были разработаны также полимеры «Парилен-*C*» и «Парилен-*D*»; они отличаются тем, что в ароматическое ядро молекулы введены соответственно один или два атома хлора. При этом дополнительно повышается нагревостойкость полимера за счет некоторого ухудшения его электрических свойств.

Для изготовления конденсаторов использовалась фольга с нанесенным на нее тонким слоем полимера. Таким образом, эти конденсаторы можно отнести к группе тонкопленочных, и мы приведем о них некоторые сведения в гл. 5. Можно также ожидать, что будут разработаны методы получения пленки ППК и в свободном виде, т. е. снятой с фольговой подложки. В обзоре Кепера, охватывающем состояние конденсаторостроения в США до 1969 г., конденсаторы из пленки «парилен» рассматриваются еще как тонкопленочные с пределами напряжения 35—75 в, так что, видимо, в настоящее время свободная пленка из этого материала еще не появилась на широком рынке.

В 1966 г. появился американский патент¹ на применение в конденсаторах пленки полифениленоксида (ПФО). Строение этого полимера в тексте патента характеризовалось формулой:



В этой формуле под радикалом —R надо понимать —CH₃, —C₆H₅, или —Cl, а под радикалом —R' надо понимать —CH₃ или —H. Полифениленоксид (ПФО) также представляет собой нагревостойкий неполярный пленочный диэлектрик. Его плотность равна 1,06 г/см³, коэффициент линейного расширения 30·10⁻⁶ град⁻¹, температура начала тепловой деформации при нагрузке 18,5 кГ/см² составляет около 190°С.

Диэлектрическая проницаемость ПФО ε=2,5—2,6; угол потерь мал — tg δ ≈ 3,5·10⁻⁴; зависимость этих характеристик от температуры показана на рис. 47. Удельное сопротивление при комнатной температуре имеет величину примерно 10¹⁷ ом·см. Для этого материала применяются также названия «норил» и «нирон». Пленка ПФО нашла применение в конденсаторах, которые получили название «синтаровых» или «конденсаторов из искусственной смолы». По данным 1968 г., для этих конденсаторов указаны пределы номинальной емкости от 4000 пф до 150 мкф и номинального напряжения от 100 до 600 в (постоянный ток). Испытательное напряжение равно двойному номинальному. Максимальный заряд конденсаторов, определяющий соотношение номинальной емкости и номинального напряжения, равен 24 000 мкк (или мкф·в). Удельный заряд конденсаторов составляет 17,5÷18,5 мкк/см³. Допуск по емкости может составлять от ±2 до ±20%. Сопротивление изоляции равно

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 3292061, 13.12.1966, Дж. Эустанс, фирма «Дженерал Электрик».

$3,5 \cdot 10^6$ Мом при 25°C ; $2 \cdot 10^5$ Мом при 85°C и $2 \cdot 10^4$ при 125°C . Пределы рабочей температуры для этих конденсаторов установлены от -75 до $+125^\circ\text{C}$.

Как показывает рис. 47, величина ϵ пленки в этом диапазоне температур монотонно снижается, причем ее изменения составляют в среднем около $-100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для намотанного конденсатора с обкладками из фольги указывается несколько иная зависимость емкости от температуры:

$t, ^\circ\text{C}$	-75	-60	-60	-20	0	25	40	60	80	100	125
$\frac{\Delta C}{C_{25}}, \%$	-2,1	-1,6	-1	-0,5	0,2	0	+0,02	+0,02	0	-0,1	-0,12
C_{25}											

Согласно данным фирмы «Индэстриал Конденсер Корпорейшн» в пределах температуры от $+10$ до $+125^\circ\text{C}$ изменение

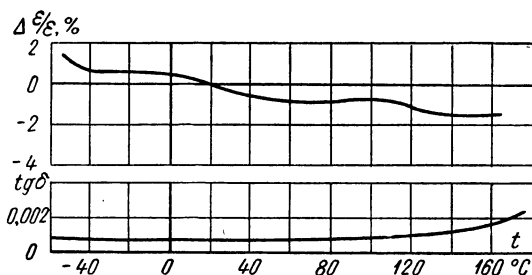


Рис. 47. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь пленки полифенилен-оксида от температуры

емкости не превышает $\pm 0,12\%$, а среднее значение ТКЕ составляет $\pm 35 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. При отрицательных температурах в пределах от -60 до -40°C ТКЕ сильно увеличен и составляет около $300 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

При частоте 1 кгц и температуре 25°C для синтаровых конденсаторов $\text{tg}\delta = (4 \div 6) \cdot 10^{-4}$.

В отношении технологии изготовления синтаровых конденсаторов имеется только несколько странное указание в обзоре Кепера о том, что они «изготавливаются пропиткой металлической фольги из алюминия или олова синтетической смолой». Вероятно, это надо понимать так, что тонкий слой смолы наносится на металлическую фольгу, как на подложку, а затем такая изолированная фольга используется для намотки секций, подобно конденсаторам из пленки ППК. Этот вопрос еще нуждается в уточнении, так же как и указанные выше данные об электрических свойствах, которые, возможно, носят рекламный характер.

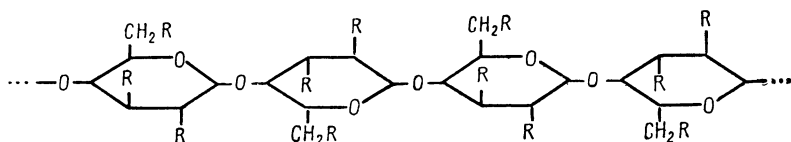
КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ ПОЛЯРНЫХ ПЛЕНОК

§ 15. Пленки из эфиров целлюлозы и их применение в конденсаторостроении

Полярная полимерная молекула целлюлозы содержит по три гидроксильные группы —ОН на каждое глюкозное кольцо, из которых составлена длинная молекулярная цепь. Наличие групп —ОН позволяет целлюлозе вступать в реакции этерификации, при которых бо́льшая или меньшая часть гидроксильных групп заменяется радикалами, представляющими собой остатки молекул кислот или спиртов. Полученные при этом продукты обработки целлюлозы носят название эфиров целлюлозы. В отличие от исходной целлюлозы ее эфиры обладают плавкостью и легко растворимы в ряде органических растворителей.

Растворимость эфиров целлюлозы позволяет получать из них свободные пленки методом отлива раствора подходящей концентрации на гладкую поверхность с последующей сушкой для удаления растворителя. Минимальная толщина таких пленок составляет 12—15 мкм; это определяется тем, что приходится учитывать пониженную прочность пленки, содержащей значительные количества растворителя, до полного завершения ее сушки.

Современная химическая промышленность имеет возможность производить этерификацию целлюлозы таким способом, который обеспечивает замещение почти всех гидроксильных групп в целлюлозной молекуле; почти в каждом звене заменяются кислотными (или спиртовыми) радикалами все три гидроксильные группы:



Уксуснокислый эфир такого типа получил название триацетата целлюлозы. В таком эфире радикалом —R является остаток уксусной кислоты CH_3COOH (т. е. $\text{CH}_3\text{COO}-$). Близкими свойствами обладает двойной эфир уксусной и масляной кислот — ацетобутират целлюлозы. В этом эфире часть радикалов —R является остатками масляной (бутириновой) кислоты — $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$.

Для триацетата и ацетобутирата в виде пленок толщиной 25—40 мкм, не содержащих пластификатора, можно привести

следующие средние характеристики:

Плотность	1,2—1,25 г/см ³
Температура размягчения	170—180° С
Гигроскопичность (при влажности 98%)	2—6%
Временное сопротивление разрыву	900—1200 кг/см ²
Удлинение при разрыве	15—20%
Число двойных перегибов	500—1000
Диэлектрическая проницаемость	3,5—3,7
Тангенс угла потерь при 20° С и 50 гц	50—70·10 ⁻⁴
1 кгц	120—150·10 ⁻⁴
1 Мгц	200—220·10 ⁻⁴
Объемное удельное сопротивление	более 10 ¹⁵ ом·см
Пробивная напряженность при 50 гц	120—160 кв/мм

Эти данные соответствуют качеству пленок, предназначенных для применения в производстве электрических машин, и взяты из литературы ФРГ. Пределы толщины для такой пленки 20—200 мкм.

В обзорной работе Галетти по синтетическим пленкам, в отличие от данных ФРГ, можно найти заметное различие в некоторых свойствах триацетата и ацетобутирата:

Тип эфира	триацетат	ацетобутират
Диэлектрическая проницаемость при 50 гц	4,3	3,8
1 кгц	4,1	3,8
Тангенс угла потерь при 50 гц	0,021	0,007
1 кгц	0,028	0,016
$E_{пр}$, кв/мм, 50 гц	112	124
$\rho_{об}$, ом·см	10 ¹³	10 ¹⁴
Гигроскопичность, %	2,5	2,0

За счет замещения полярных гидроксильных групп менее полярными радикалами кислотных остатков величины ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ эфиров целлюлозы заметно снижены в сравнении с целлюлозой (клетчаткой), для которой можно принять $\epsilon=6,6$ и $\operatorname{tg} \delta=0,060 \div 0,070$ (при частоте 50 гц). По этой же причине резко снижена и гигроскопичность эфиров целлюлозы. Тем не менее она остается выше, чем у других синтетических пленок. В связи с этим, как показывает табл. 9, электрические свойства эфиров целлю-

Таблица 9

Относительная влажность, % при $t=20^\circ\text{C}$	По Генингену			По Мистичу					
	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$, %	$\rho_{об}$, ом·см	ϵ		$\cos \varphi$, %		$\rho_{об}$, ом·см	$E_{пр}$, кв/мм
	1 кгц	1 кгц		1 кгц	1 мгц	1 кгц	1 мгц		
0	3,6	1,2—1,5	$4 \cdot 10^{15}$	3,8	3,5	1,5	2,3	10^{15}	150
50	3,8	1,5—1,6	$1 \cdot 10^{15}$	4,8	4,4	1,6	3,1	10^{13}	120
80	4,0	1,8—2,5	$3 \cdot 10^{14}$	—	—	—	—	—	—
98	—	—	—	7,5	7,0	3,7	3,7	10^{10}	72

лозы (ацетатной пленки) заметно ухудшаются при повышении влажности.

Термин «ацетатная пленка» не дает полного представления о составе пленки; по-видимому, в таблице приводятся данные для ацебутиратной пленки.

Данные табл. 9 показывают, что влияние влажности на электрические свойства достаточно заметно для того, чтобы считать необходимыми сушку и герметизацию конденсаторов из подобной пленки. Мистич отмечает, что, несмотря на относительно небольшое количество влаги, удерживаемое пленкой, удаление ее связано с трудностями. Эти трудности увеличиваются, когда пленка намотана в виде конденсаторной секции. Остаточная влажность пленки не только ухудшает электрические характеристики конденсатора, но и резко снижает срок его службы особенно при повышенных температурах. Для того чтобы провести тщательную сушку секций из ацетатной пленки, необходимо применять высокий вакуум и достаточно высокую температуру. Последующая пропитка секций и герметизация конденсатора защищает его от воздействия влаги окружающей среды.

По-видимому, только одна фирма в США — «Конденсер Продэктс» — широко рекламировала конденсаторы из ацетатной пленки (пленка «пластикон-А»). Для пропитки этих конденсаторов использовалось минеральное масло (верхний предел рабочей температуры конденсатора 105°C) и полисилоксановая жидкость (верхний предел 125°C).

Пропитка мало изменяет емкость и угол потерь ацетатных конденсаторов, но заметно улучшает электрическую прочность и напряжение начала ионизации. Емкость ацетатных конденсаторов возрастает с температурой. Среднее значение ТКЕ для диапазона температур от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$ составляет, по данным Мистича, для сухого конденсатора или пропитанного полисилоксановой жидкостью $1060 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, а для пропитанного маслом $+1190 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По характеру изменения емкости с температурой такие конденсаторы хуже бумажных.

Величина угла потерь этих конденсаторов также несколько хуже, чем у бумажных, как показывает разброс этой характеристики, по фирменным данным на рис. 48, а; при частоте 60 гц $\cos \varphi$ проходит через максимум при температуре -30°C , составляя $1,7-2\%$; минимум при этой частоте лежит при температурах $60-80^{\circ}\text{C}$, составляя $0,6-0,8\%$; для доброкачественных бумажных конденсаторов можно получать значения до $0,2-0,3\%$ и даже ниже. Влияние частоты на величину угла потерь ацетатных конденсаторов, по данным Мистича, дано на рис. 48, б.

Постоянная времени ацетатных пропитанных конденсаторов того же порядка, как у бумажных; для тщательно высушенных, но непропитанных конденсаторов она несколько выше, чем у пропитанных.

Измерение коэффициента абсорбции при $\tau_1 = 15$ мин, $\tau_2 = 1$ сек и $\tau_3 = 1$ ч дало значения: при 20°C — 5,2%, при 50°C — 5,7% и при 75°C — 6,2%; для непропитанных конденсаторов можно получать k_a порядка 2%, но они могут применяться лишь при напряжениях постоянного тока не свыше 600 в.

Пропитанные конденсаторы пригодны для работы при высоких напряжениях постоянного тока; их выгодно применять при напряжениях выше 2 кВ, так как при этом повышается их удельная энергия; это объясняется тем, что нижний предел толщины пленки относительно велик — 12—15 мкм; при снижении напряжения до 2—3 кВ мы доходим до минимального зна-

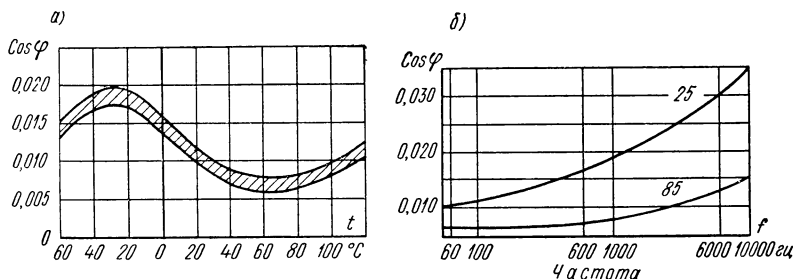


Рис. 48. Коэффициент мощности ацетатных конденсаторов: а — разброс температурной зависимости (60 гц) по каталогу фирмы; б — частотная зависимость (пропитанные конденсаторы) при 25 и 85° С

чения толщины диэлектрика $d_{\min}$ и при еще более низких напряжениях должны применять то же значение $d_{\min}$, т. е. снижать значение $E_{\text{раб}}$ (удельная энергия пропорциональна квадрату этой величины).

При относительно больших номинальных напряжениях и ограниченном верхнем пределе рабочей температуры для ацетатных конденсаторов приняли значение $E_{\text{раб}}$ в 1,5—2 раза выше, чем для бумажных конденсаторов, что позволяло выиграть в объеме при тех же номинальных данных до 4 раз. Мистич указывал, что при 65°C и $E_{\text{раб}} = 60$ кВ/мм срок службы ацетатных конденсаторов измерялся тысячами часов. При работе в режиме однократных импульсов (фотовспышка, сварка разрядом, рентгеновская аппаратура) величину $E_{\text{раб}}$ повышали до 80 кВ/мм. Для бумажных конденсаторов КБГ при напряжениях выше 2 кВ удельная энергия равна 7,7 дж/дм³, а для ацетатных конденсаторов («пластикон-А») она составляет 33 дж/дм³; эта величина соответствует длительному режиму работы при постоянном напряжении. Для работы в режиме фотовспышки $E_{\text{раб}}$ повышается до 100 дж/дм³, но лишь при температурах до 65°C . При повышении температуры допускаемое напряжение, а следовательно, и величина $E_{\text{раб}}$ как при дли-

тельным, так и при кратковременном воздействии напряжения должны снижаться: до 70% $U_{\text{ном}}$ при 70°С и до 55% — при 105°С; при пропитке полисилоксаном допускается работа при 125°С при 40% $U_{\text{ном}}$.

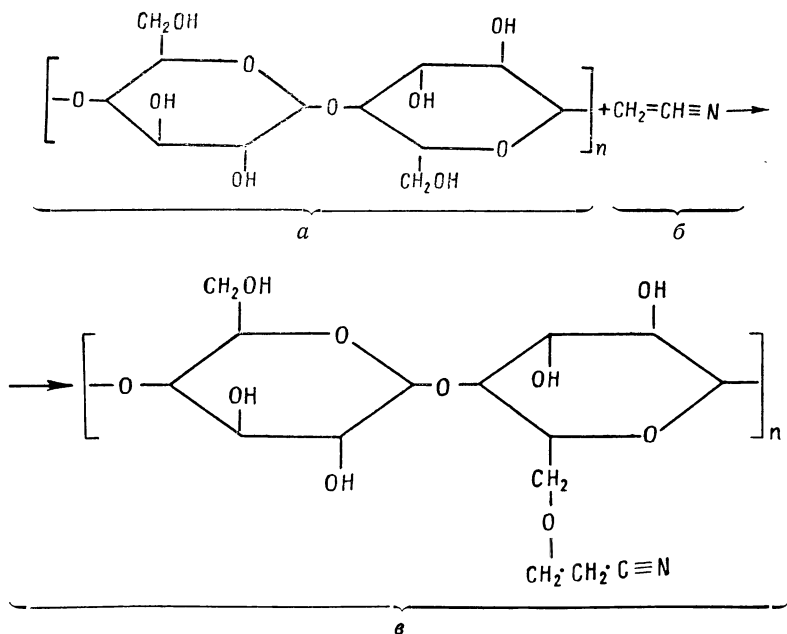
В последние годы реклама по конденсаторам типа «пластикон-А» исчезла со страниц технических журналов США. В других странах эти конденсаторы вообще не находили себе применения.

Описанные выше эфиры целлюлозы находят себе применение в настоящее время в лакопленочных тонкослойных конденсаторах, которые будут рассмотрены ниже (§ 26), но можно думать, что и в этом типе конденсаторов пленки из эфиров целлюлозы не являются особенно перспективным диэлектриком.

Известный интерес представляет собой новый тип эфира целлюлозы — цианэтилцеллюлоза, в которой замещение гидроксильных осуществлено цианэтильными группами: $-\text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CN}$. В отличие от других эфиров целлюлозы, в которых гидроксилы замещены менее полярными группами, что дает снижение ϵ и $\text{tg } \delta$ по сравнению с исходной целлюлозой, в цианэтилцеллюлозе вместо гидроксила введена более полярная группа, и этот эфир имеет в связи с этим более высокую ϵ и больший $\text{tg } \delta$, чем исходная целлюлоза.

Схематически реакцию цианэтирования можно представить так:

здесь a — целлюлоза, b — акрилонитрил и c — частично циан-



этилированная целлюлоза. В зависимости от степени замещения гидроксильных в глюкозных кольцах целлюлозы можно получать моноцианэтилцеллюлозу, дицианэтилцеллюлозу и трицианэтилцеллюлозу. При этом полярность полученного продукта и его ϵ соответственно возрастают, как показано на рис. 49, а.

При низкой частоте и комнатной температуре можно получать для трицианэтилцеллюлозы значение $\epsilon=15,5$, т. е. резко увеличенное в сравнении с тем, что удается получать для других

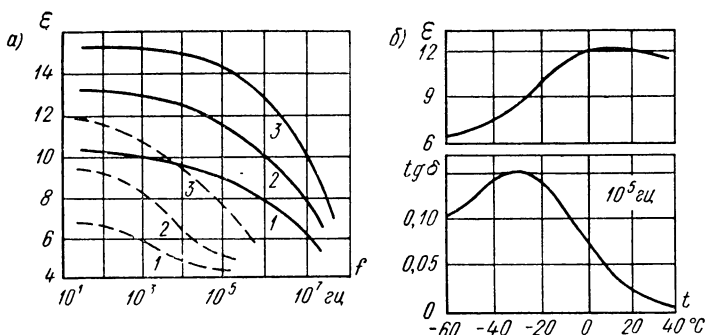


Рис. 49. Характеристики цианэтилированной целлюлозы: а — зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

1 — моно-, 2 — ди-, 3 — трицианэтилцеллюлоза; сплошные кривые — при $+25^\circ\text{C}$, пунктирные — при -53°C ;

б — зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь от температуры при $0,1 \text{ Мгц}$ для дицианэтилцеллюлозы

полярных полимеров и органических твердых диэлектриков вообще. Повышение частоты приводит к уменьшению ϵ , но для того, чтобы вызвать резкое снижение ϵ при комнатных температурах, надо переходить в область частот, превышающих 10^4 гц , что для многих конденсаторов с полярным диэлектриком не требуется. При переходе в область низких температур ϵ уменьшается и ее зависимость от частоты усиливается. Но даже при -53°C в области низких частот порядка $10\text{—}100 \text{ гц}$ еще можно получать ϵ порядка $10\text{—}12$ при использовании три- и дицианэтилцеллюлозы.

На рис. 49, б показана зависимость ϵ и $\text{tg } \delta$ от температуры при частоте 100 кгц для образца цианэтилцеллюлозы с содержанием азота $9,5\%$. При этой частоте релаксационный максимум лежит в области температур ниже нуля, около -30°C ; при низких частотах он должен сдвинуться еще дальше в область низких температур. Величина $(\text{tg } \delta)_{\text{макс}}$ составляет около $0,150$, т. е. примерно в $2\text{—}3$ раза выше, чем соответствующее значение

для целлюлозы. При переходе в область положительных температур $\operatorname{tg} \delta$ цианэтилцеллюлозы снижается до величины 0,01—0,02.

В 1960 г. появилось сообщение фирмы «Цианамид» (США) о выпуске нового типа пленки с высокой диэлектрической проницаемостью под названием «цианосель». Пределы толщины пленки от 2,5 до 125 $\mu\text{м}$; для нее указывались следующие свойства: при частоте 1 кГц $\epsilon=13$ и $\operatorname{tg} \delta < 0,02$; при частоте 1 МГц $\epsilon=10$ и $\operatorname{tg} \delta=0,12$. Сопоставляя эти данные с кривыми на рис. 49, а, можно думать, что эта пленка изготовлена на основе дицианэтилцеллюлозы. В этом же году в одном из обзоров, опубликованных в США, было указано, что при толщине 50 $\mu\text{м}$ и частоте 60 Гц пленки из цианэтилцеллюлозы имеют $\epsilon=10 \div 15$ и $\operatorname{tg} \delta=0,010 \div 0,025$; пленки отличаются эластичностью и имеют удовлетворительную механическую прочность (375 кГ/см^2 при относительной влажности 50%). Применение их в конденсаторах позволяет получить выигрыш в удельной емкости в 2—6 раз в сравнении с другими типами пленочных конденсаторов.

В 1963 г. в японских обзорах по американской технике упоминалась пленка «цианосель» с нижним пределом толщины 2—2,5 $\mu\text{м}$, отличающаяся высокой погодо- и химостойкостью, газонепроницаемостью, весьма малой гигроскопичностью и стойкостью к ультрафиолетовому облучению. Плотность пленки 1,2 г/см^3 , временное сопротивление разрыву 378 кГ/см^2 при удлинении 9%; пробивная напряженность на воздухе при 25°С равна 23 кВ/мм и в масле 75 кВ/мм ; по другим данным, в масле $E_{\text{пр}}=104 \text{ кВ/мм}$ при толщине 15 $\mu\text{м}$. Зависимость ϵ от частоты характеризуется следующими данными:

Частота	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц
Диэлектрическая проницаемость . .	13,0	12,8	12,3	11,7	10,0

По другим данным $\epsilon=15,6$ при частоте 1 кГц . Для величины $\operatorname{tg} \delta$ указываются значения 0,02 при 10 кГц и 0,12 при 1 МГц . Для гигроскопичности указывается значение 3,6%, а для удельного сопротивления 10^8 — $10^{11} \text{ ом}\cdot\text{см}$. Отмечается, что пленка этого типа, металлизированная алюминием или цинком, находит себе применение в миниатюрных конденсаторах, от которых не требуется малый угол потерь. По-видимому, упоминание о применении пленки в конденсаторах относилось лишь к отдельным опытным партиям, так как в 1965 г. в статье Фишера сообщалось, что правительство США финансирует разработку малогабаритного лакопленочного конденсатора с диэлектриком из цианэтилцеллюлозы, имеющей $\epsilon=12$. Таким образом, можно думать, что в 1965 г. промышленного выпуска таких конденсаторов в США еще не было.

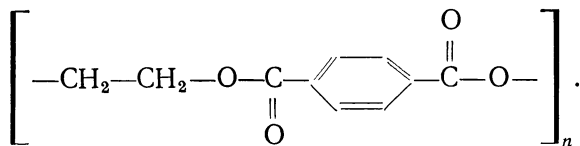
Надо полагать, что основным ограничением в применении пленки данного типа в конденсаторостроении является не

высокий $\operatorname{tg} \delta$, который не играл бы большой роли при работе в цепи постоянного тока, а скорее низкое удельное сопротивление. Действительно, если при комнатной температуре величина $\rho_{\text{об}}$ равна $10^{10} \text{ ом} \cdot \text{см}$, то соответствующее значение постоянного времени конденсатора составляет: $RC = 0,0884 \epsilon \rho_{\text{об}} \cdot 10^{-12} = 0,0884 \cdot 15 \cdot 10^{-2} = 0,012 \text{ сек}$, т. е. при емкости 1 мкф сопротивление изоляции будет равно $0,01 \text{ Мом}$. При таком значении утечки конденсатор уже не может успешно применяться при постоянном напряжении даже при комнатной температуре, не говоря уже о повышенной. Таким образом, можно лишь говорить об использовании этих конденсаторов при переменном напряжении низкой частоты и при небольших температурах, что весьма ограничивает их применение.

Вопрос об использовании цианэтилированной целлюлозы в пленочных конденсаторах упирается в проблему повышения удельного сопротивления. Можно опасаться, что высокая проводимость диэлектрика вызвана не наличием каких-то технологических загрязнений, от которых всегда можно избавиться, а, вероятно, присуща самому органическому диэлектрику при столь высоких значениях диэлектрической проницаемости. Если это так, то возможность снижения проводимости и повышения $\rho_{\text{об}}$ делается маловероятной, а тогда особых перспектив на применение данных пленок в конденсаторостроении ожидать трудно.

§ 16. Полиэфирные пленки для конденсаторов

Первым представителем класса полиэфиров, нашедшим себе применение в конденсаторостроении, явился полиэтилентерефталат — ПЭТФ, получаемый в виде линейного полимера при поликонденсации этиленгликоля $\text{HOCH}_2\text{—CH}_2\text{OH}$ и терефталевой кислоты $\text{HOOC—}\langle \text{C}_6\text{H}_4 \rangle\text{—COOH}$. Структурная формула этого полимера имеет вид:



Симметричная структура терефталевой кислоты обеспечивает отсутствие в молекуле полимера боковых ответвлений. Большое содержание дипольных групп $\text{—}\overset{\text{O}}{\overset{\parallel}{\text{C}}}\text{—O—}$ объясняет кри-

сталличность полимера; содержание кристаллической фазы доходит до 65—75%. Температура плавления полимера составляет 220—260° С; температура стеклования 60—80° С. Молекулярный вес лежит в пределах 12 000—20 000.

В настоящее время ПЭТФ изготавливается в большинстве индустриально развитых стран мира. В СССР он известен под названием «лавсан», в США — «майлар», в Англии — «мелинекс», во Франции — «терфан», в ФРГ — «хостафан», в Италии — «монтивель», в Японии — «люмиррор».

Вытянутые на холоду пленки и нити, по данным Э. И. Барга, дают рентгенограмму ориентированных кристаллов. При вытяжке 400—500% временное сопротивление разрыву увеличивается до 10 раз и может достигать значений 3500—4000 кг/см^2 . Обычно пленка имеет прочность несколько ниже, примерно 2000—3000 кг/см^2 , но и такое значение много больше, чем у типов синтетических пленок, которые мы рассматривали выше, а также больше, чем для конденсаторной бумаги (обычно 900—1200 кг/см^2). Это обстоятельство уже на первом этапе освоения производства пленок из ПЭТФ позволило получить нижний предел толщины пленки 6 мкм ; в настоящее время за рубежом в производственном масштабе выпускаются пленки толщиной 3,5—4 мкм и имеются сведения о лабораторном изготовлении пленок толщиной 2 мкм .

По данным Тэрнера, для таких материалов, как ПЭТФ, которые при расплавлении быстро переходят в состояние низковязкой жидкости, получение пленок удобно вести путем выдавливания расплавленного продукта через щель на поверхность тщательно полированного охлаждаемого металлического барабана, с которого далее снимается остывшая пленка. При этом получается заготовка толщиной в 10 раз выше, чем требуется от готовой пленки. С целью уменьшения толщины и получения ориентации молекул для повышения прочности производится вторая операция — растяжка пленки при температуре ниже температуры выдавливания, но выше температуры стеклования. Растяжку ведут в двух направлениях, чтобы избежать склонности односторонне вытянутой пленки к продольному растрескиванию.

По данным Вули, Комана и Мак Магона, опубликовавших одну из первых работ по применению пленки ПЭТФ для конденсаторов, эта пленка имеет плотность 1,4 г/см^3 , бесцветна, прозрачна; имеет высокую прочность на разрыв и большое сопротивление раздиранию; для нее характерны высокая влагостойкость и устойчивость против гидролиза. Электрическая прочность выше, чем у конденсаторной бумаги и при толщине 30 мкм составляет 240 кв/мм ; при обычном испытании на содержание токопроводящих частиц в отличие от испытания бумаги таких частиц не обнаруживается. Диэлектрическая проницаемость и угол потерь имеют следующие значения:

Частота, кГц	1	10	100
Диэлектрическая проницаемость	3,4	3,4	3,3
Тангенс угла потерь $\text{tg } \delta \times 10^4$	55	180	160

Удельное объемное сопротивление при комнатной температуре и напряжении 400 в составляет $3 \cdot 10^{15}$ ом·см.

Электрические свойства пленки могут быть заметно улучшены прогревом; термообработка при 200°C в течение 2 ч уже дает существенное улучшение характеристик. Короностойкость пленки хотя и выше, чем у фторсодержащих полимеров, но все же недостаточно высока; поэтому непропитанные конденсаторы из пленки ПЭТФ рекомендуется применять при напряжениях

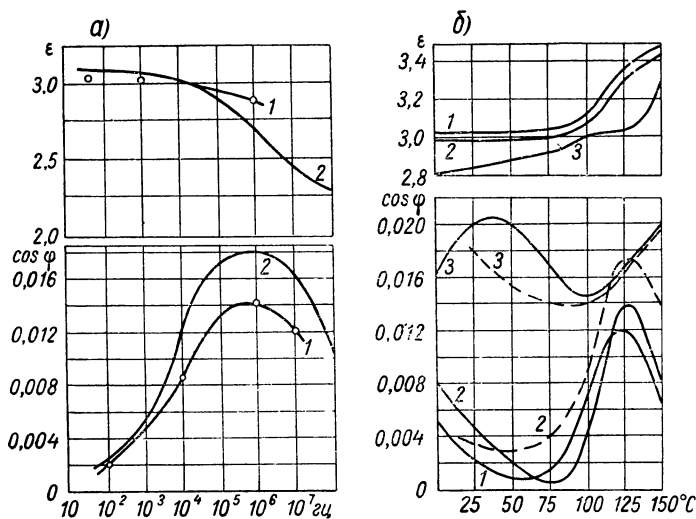


Рис. 50. Частотно-температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента мощности полиэтилентерфталатной пленки: а — частотная зависимость при 20°C ;

1 — «мелинекс» (по Дэммеру); 2 — «майлар» (по Хиппелю);

б — температурная зависимость для «мелинекса» (по Дэммеру);

1 — 50 гц; 2 — 1 кгц; 3 — 1 Мгц (пунктир — по данным Козенса)

переменного тока не выше 300 в; при бóльших значениях напряжения требуется пропитка.

Частотно-температурные зависимости ϵ и угла потерь для пленки ПЭТФ, по данным разных авторов, показаны на рис. 50. Разброс данных мог быть вызван различиями в методике измерения, но, может быть, зависел и от различия в качестве образцов, в частности, от неодинакового соотношения аморфной и кристаллической фаз. При комнатной температуре заметное снижение ϵ пленки с ростом частоты наблюдается лишь при частотах выше 0,1 Мгц; частотный максимум потерь соответствует частоте порядка 1 Мгц. В области положительных температур ϵ мало зависит от температуры до 80 — 85°C при низ-

ких частотах; при радиочастотах и в этой области температур наблюдается заметное изменение ϵ . При частотах 50 и 1000 гц при температуре 125° С можно увидеть резко выраженный температурный максимум угла потерь; это высокотемпературный максимум, который заметно зависит от содержания аморфной фазы и увеличивается для «закаленных» пленок с большим ее содержанием. Низкотемпературный максимум при таких значениях частоты проявляется в области температур ниже нуля и на рис. 50 не виден; при частоте 1 Мгц этот максимум смещается к температуре 35—40° С и может быть обнаружен на сплошной кривой 3; на пунктирной кривой он сдвинут в сторону более низких температур.

Указанное выше значение $\rho_{об}$ преуменьшено; возможно, оно относится к образцу с очень большим содержанием аморфной фазы. По данным Хиппеля, даже при 130° С величина $\rho_{об}$ превышает 10^{14} ом·см, а при 200° С еще составляет около 10^{11} ом·см. Мистич приводит для пленки «майлар» значение 10^{19} ом·см при комнатной температуре.

При сравнительном исследовании кратковременной электрической прочности пленки «мелинекс» 9 мкм и пленки «лавсан» 10 мкм при частоте 50 гц и электродах небольшой площади значение $E_{пр}$, соответствующее вероятности пробоя 50%, составило 166 кВ/мм для пленки «мелинекс» и 270 кВ/мм для пленки «лавсан». Значения $E_{пр}$ могут быть и выше, чем указано здесь. Так, для тонких пленок при использовании серебряных электродов диаметром 25 мм при 20° С Руби получил следующие значения: 460 кВ/мм при 5,5 мкм, 380—400 кВ/мм при 6,25 мкм и 340 кВ/мм при 7,5 мкм. В США пленка «майлар» изготавливается нескольких марок для различного применения. Для конденсаторостроения предназначается пленка «майлар-С».

Для пленки «хостафан», изготавливаемой в ФРГ, приводились следующие данные об электрических свойствах:

Пробивная напряженность по VDE 0303 при 20° С, 50 гц и 40 мкм	160 кВ/мм
Диэлектрическая проницаемость при 800 гц	3,2
Тангенс угла потерь при 800 гц	$40 \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление	примерно 10^{17} ом·см
Коэффициент абсорбции	0,2%

Эти данные достаточно близко сходятся с данными для американского «майлара» и английского «мелинекса» и мало отличаются от данных для отечественного «лавсана».

По более новому каталогу фирмы «Калле» (ФРГ) для пленки «хостафан» типа RG указываются следующие значения механических и физических свойств: в продольном направлении $\sigma_p = 2600 \div 3500$ кг/см² и удлинение 40—80%, а в поперечном — $1600 \div 2500$ кг/см² и 100—160%; усадка при нагревании при 100° С около 1%, при 130° С — 2,5%, при 150° С — 3,5% и при

180°С — 5%; коэффициент линейного расширения $4 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹; теплоемкость 0,27 кал/град·г; коэффициент теплопроводности $5 \cdot 10^{-4}$ кал/см·сек·град; коэффициент влагопроницаемости при влажности 85% и 20°С равен 2 г/м²·24 ч при толщине 10 мкм и соответственно 2 г/м²·24 ч при 100 мкм. Пленка выпускается с номинальными значениями толщины 3,5; 6; 8; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 35; 50; 75; 100 и 125 мкм с допуском по толщине $\pm 10\%$.

В настоящее время в США, кроме обычной пленки ПЭТФ, выпускается еще один тип полиэфирной пленки под названием «Т-16», или «кодар» (фирма «Истман»), обладающей улучшенными свойствами по сравнению с пленкой ПЭТФ. Этот поли-

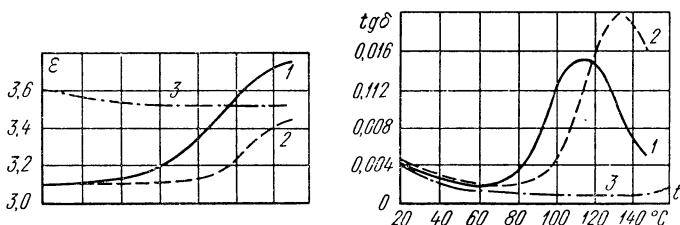
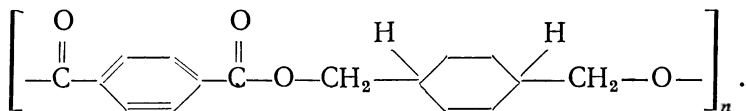


Рис. 51. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь полиэфирных пленок от температуры
1 — «майлар»; 2 — «кодар» (Т16); 3 — новый вид полиэфира

эфир представляет собой поли-1,4-циклогексилендиметилентерефталат и имеет структурную формулу:

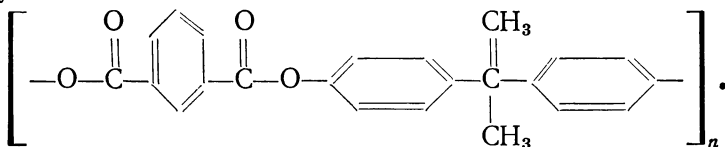


Пленка из такого полиэфира, известная также под названием «терафилм», отличается от пленки ПЭТФ более высокой температурой размягчения, что сдвигает подъем кривых ϵ и $\text{tg } \delta$ для этой пленки в сторону более высоких температур, чем у обычной пленки ПЭТФ (рис. 51). Емкость конденсаторов, изготовленных из такой пленки, практически не изменяется при повышении температуры до 110°С, а при 150°С увеличивается только на 5%. При этих температурах сроки службы конденсаторов из пленки «терафилм» выше, чем у конденсаторов из пленки «майлар», поскольку новая пленка обладает еще более высокой стойкостью к гидролизу. Зависимость ϵ и $\text{tg } \delta$ пленки «терафилм» от частоты характеризуются следующими данными (комнатная температура):

Частота, кгц	0,1	1	10	100	1000	10 000
ϵ	3,15	3,12	3,10	3,02	2,92	2,90
$\text{tg } \delta \cdot 10^4$	30	65	110	125	120	125

В японском обзоре отмечается маслостойкость, химостойкость и короностойкость этой пленки; пределы толщины от 3 до 300 $\mu\text{м}$; прочность на разрыв 1600—2800 кг/см^2 и $\rho_{\text{об}}$ примерно 10^{18} $\text{ом}\cdot\text{см}$. Японцы отмечают, что нагревостойкость этой пленки соответствует классу В, т. е. длительной работе при 130° С. К сожалению, не было указано сравнительной стоимости пленки «Т-16» и обычной пленки ПЭТФ, что не позволяет дать ей полную технико-экономическую оценку. Все же, по-видимому, этот материал следует считать перспективным, и если цена его будет лишь ненамного выше цены обычной пленки ПЭТФ, то он сможет вытеснить обычную пленку ПЭТФ из конденсаторного производства.

В 1966 г. в США был предложен¹ для использования в конденсаторостроении еще один полиэфир с улучшенными электрическими свойствами и повышенной рабочей температурой, а именно: полибис(гидроксифенол) алканфталат, имеющий формулу:



Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь пленки из такого эфира от температуры показана на рис. 51 в виде кривых 3. Величина ϵ примерно на 10% выше, чем у пленок ПЭТФ или «терафилм» и мало изменяется с температурой; в диапазоне положительных температур отсутствует характерный дипольный максимум потерь и $\text{tg } \delta$ сохраняет значение менее 0,2% вплоть до 160° С. Этот полиэфир представляет несомненный интерес для применения в конденсаторном производстве.

§ 17. Полиэтилентерфталатные конденсаторы

За последние годы пленка ПЭТФ приобрела большую популярность у конденсаторостроителей всего мира и применяется даже в тех странах, где ее производство еще не освоено и приходится приобретать за счет импорта. При изготовлении конденсаторов на небольшие напряжения, когда не требуется пропитка (как для бумаги), пленка ПЭТФ позволяет упростить как технологию, так и конструкцию конденсатора, что делает ее экономически выгодной, даже если она дороже бумаги, тем более, что применение тонкой пленки дает возможность сократить расход пленочного диэлектрика по сравнению с бумажным. Таким образом, эта пленка начинает выступать серьезным конкурентом конденсаторной бумаги в производстве намотанных конденсаторов для электронной техники.

¹ Пат. США, кл. 317—247, № 3259816, 07.07.1966, А. Катчмен.

В отличие от бумаги пленка ПЭТФ из-за очень малого содержания ТПВ позволяет изготавливать однослойные конденсаторы с обкладками из фольги. Они имеют преимущество перед металлизированными благодаря более высокой и более стабильной постоянной времени. Однако намотку таких конденсаторов надо вести в обеспыленном помещении, так как сильно электризуемая пленка притягивает частицы пыли, создающие слабые места в однослойном диэлектрике и снижающие выход годных конденсаторов. Конденсаторы из пленки ПЭТФ с фольговыми обкладками изготавливаются также и многослойного типа, в том числе и пропитанные для высокого напряжения. Широко изготавливаются также металлизированные конденса-

Таблица 10

Температура запекания, °C	Пробивная напряженность, кв/мм, при толщине			
	10 мкм	6 мкм	3,8 мкм	3,5 мкм
120	—	—	217	152
140	250	224	311	209
160	150	211	197	137
190	90	190	—	—
210	59	88	—	—

торы из пленки ПЭТФ обычно с использованием алюминия для металлизации пленки.

Так же как и другие ориентированные пленки, намотанные из пленки ПЭТФ конденсаторные секции обычно подвергают запеканию при повышенной температуре. В данном случае эта операция не только дает стабилизацию

емкости, как в полистирольных конденсаторах, но также улучшает и остальные электрические характеристики за счет кристаллизации аморфных областей материала; спекание витков пленки на торцах секции улучшает ее влагостойкость. О режиме запекания можно найти в литературе и патентах ряд указаний. Вули, Коман и Мак Магон отмечают, что температура запекания для пленки «майлар» должна быть не выше 210°С во избежание снижения электрической прочности. В английском патенте¹ применительно к пленке «мелинекс» рекомендуется вакуумная сушка при 50°С, а затем запекание при 180—200°С в течение 1,5 ч. В другом английском патенте² также рекомендуется вакуумная сушка с последующим запеканием при 207°С в течение 2 ч; в американском патенте³ рекомендуется такая же температура запекания, но при выдержке 0,5 ч. Иногда применяют меньшие температуры, примерно 160—170°С, но с большей выдержкой — около нескольких часов. В. Колонич исследовала влияние режима запекания (время запекания 3 ч) на электрическую прочность металлизированных конденсаторов из пленки ПЭТФ и получила результаты, приведенные в табл. 10.

¹ Англ. пат., кл. 37, № 811984, 15.04.1959, К. Вильямс.

² Англ. пат., кл. 37, № 811982, 15.04.1959, Ф. Ч. Робинзон, Ф. Р. Бекетт.

³ Пат. США, № 2786352, 12.03.1957, П. Невервуд.

Данные табл. 10 показывают, что при небольших толщинах пленки не следует увеличивать температуру запекания свыше 160°C , так как при этом можно получить уже заметное снижение электрической прочности. Колонич отмечает, что снижение $E_{\text{пр}}$ для пленки $3,5\text{ мкм}$ не случайно; в отличие от остальных пленок, полученных из США, пленка $3,5\text{ мкм}$ была изготовлена в ФРГ и характеризовалась пониженной температурой размягчения. Для этой пленки при длительной работе не следует допускать температуру, превышающую 85°C .

В связи с хорошей влагостойкостью ПЭТФ конденсаторы из этой пленки обычно выпускают или открытого типа, подобно полистирольным конденсаторам, или, чаще, уплотненного типа,

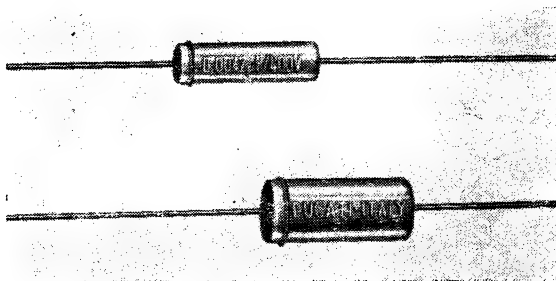


Рис. 52. Полиэтилентерфталатные конденсаторы опрессованного типа

используя различную методику уплотнения. Наряду с опрессовкой пластмассой (обычно полипропиленом) (рис. 52) применяют окукливание в эпоксидном компаунде, сборку в алюминиевой трубочке, с заливкой торцов эпоксидным компаундом и т. п. В США применяют также конструкцию, называемую «Рэп энд филл» («заверни и залей»), при которой намотанная секция обертывается более толстой пленкой, ширина которой больше длины секции, а полученные с торцов углубления заливаются влагостойким компаундом. Реже, в особо тяжелых условиях работы, применяются и герметизированные конструкции в виде запаянных металлических (со стеклянными изоляторами) или стеклянных трубочек либо прямоугольных сварных или паяных корпусов с выводными изоляторами, подобными тем, которые используются в производстве бумажных конденсаторов. Очевидно, только герметизированный тип конденсатора полностью пригоден для длительной работы при высокой влажности, особенно при тропической; уплотненные конструкции могут обеспечить устойчивую работу при длительном воздействии влажности 80% , а при влажности 98% могут обеспечить лишь кратковременную работу; большинство фирм, выпускающих

подобные конденсаторы, обходят в рекламе вопрос о допустимом значении влажности воздуха при длительной работе.

Вопрос о допуске интервале рабочих температур решается разными фирмами по-разному. Нижний предел рабочей температуры указывается равным $-25 \div -70^\circ \text{C}$, а верхний $+85 \div +155^\circ \text{C}$. Обычно номинальное напряжение указывается при $+85^\circ \text{C}$, а далее дается «derating»; при 150°C снижение напряжения по сравнению с номинальным значением доходит до 3 раз.

В публикации 202 (1965 г.) Международной электротехнической комиссии (МЭК) «Конденсаторы с диэлектриком из полиэфирной пленки для постоянного тока» номинальное напряжение установлено для температуры $+40^\circ \text{C}$. Конденсаторы могут изготавливаться для следующих категорий температуры и влажности (по публикации 68 МЭК):

Категория	55/125/56	40/085/21	10/085/04
Пределы рабочей температуры, $^\circ \text{C}$	$-55 \div +125$	$-40 \div +85$	$-10 \div +85$
Длительность испытания на влажность, сутки . .	56	21	4

Величина напряжения, допускаемого для длительной работы при максимальной температуре категории, устанавливается изготовителем. Можно отметить, что в проекте этого документа МЭК, изданном в 1960 г., номинальное напряжение устанавливалось при 85°C включительно: при 125°C допускалось напряжение, равное 50% номинального, а при 140°C — равное 30% номинального. В публикации 1965 г. указаны менее жесткие требования, видимо, с учетом интересов производителей конденсаторов. Для отечественных конденсаторов типа К73-П установлен предел температуры $+85^\circ \text{C}$ без снижения напряжения.

Зависимость емкости конденсаторов из пленки ПЭТФ от температуры имеет непрямолинейный характер, как показано на рис. 53, при частоте 1 кГц. Емкость относительно мало изменяется в интервале от $-20 \div -25^\circ \text{C}$ до $+80 \div +85^\circ \text{C}$; при $-50 \div -60^\circ \text{C}$ емкость снижается на 5% и больше; при $+125^\circ \text{C}$ емкость возрастает на 10—15%; поэтому, если указывается верхний предел температуры 150°C , как это делают некоторые фирмы, надо иметь в виду, что при этой температуре емкость конденсатора может уже значительно отличаться от номинала, установленного для комнатной температуры. На рис. 53 кривые 1 и 2, по данным американских источников, заметно отличаются от кривой 3, по английскому источнику; поэтому можно полагать, что кривая 3 соответствует более высокому содержанию аморфной фазы; вероятно, это обусловлено различием в технологии получения пленки или в режимах запекания конденсаторов.

Публикация 202 МЭК устанавливает для конденсаторов из пленки ПЭТФ стандартные допуски по емкости: ± 5 , ± 10 и

$\pm 20\%$. Такие же допуски указываются в рекламе большинства фирм, выпускающих подобные конденсаторы как с фольговыми, так и с металлизированными обкладками. Некоторые фирмы, например «ГАМ» (Франция), оговаривают возможность изготовления этих конденсаторов по специальным заказам и с более узким допуском: ± 2 и даже $\pm 1\%$; другая французская фирма («ЛТТ») оговаривает допуск $\pm 2,5\%$. Для нашего типа конденсатора из пленки ПЭТФ повышенной точности, К73-П4,

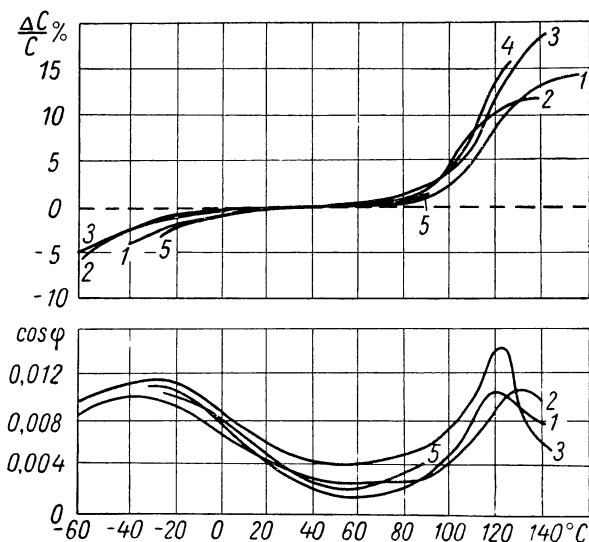


Рис. 53. Зависимость емкости и коэффициента мощности полиэтилентерефталатных конденсаторов от температуры при частоте 1 кГц

1 — по Вули, Коману и Мак Магону (США); 2 — по Мистичу (США); 3 — по Дэммеру (Англия); 4 — по Козенсу (Англия); 5 — по каталогу фирмы «Дукати» (Италия)

оговорен допуск по емкости $\pm 1\%$ и $\text{TKE} = \pm 200 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{град}^{-1}$, но верхний предел рабочей температуры снижен до 70°C .

При частоте 1 кГц и температуре 20°C , по данным рис. 53, значения $\cos \varphi$ (то же, что $\text{tg } \delta$) лежат в пределах от 0,004 до 0,006. Обычная норма в рекламах различных фирм — от $\text{tg } \delta \leq 0,006$ до $\text{tg } \delta \leq 0,010$ (при указанных выше значениях частоты и температуры). Публикация 202 МЭК устанавливает норму: $\text{tg } \delta$ — не выше 0,010. Фирма «СЭЛ» (ФРГ) указывает допустимые значения $\text{tg } \delta$ для конденсаторов из пленки ПЭТФ в зависимости от их емкости и от частоты:

Номинальная емкость,					
мкф	0,01 ÷ 0,1	0,1 ÷ 1,0	1 ÷ 10	10 ÷ 25	25 ÷ 50
tg δ при 1 кГц	0,008	0,008	0,010	0,016	0,025
10 кГц	0,012	0,014	0,018	—	—

Эта же фирма указывает пределы ТКЕ: для температур от $+20$ до $+60^\circ\text{C}$ $\text{ТКЕ} = + (100 \div 230) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и для температур от $+60$ до $+85^\circ\text{C}$ $\text{ТКЕ} = + (230 \div 1200) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Зависимость емкости и $\cos \varphi$ майларовых конденсаторов от частоты при разных значениях температуры, по данным Мистича, показаны на рис. 54. На этом же рисунке показаны пунктиром кривые частотных зависимостей при 25°C для мелинексовых конденсаторов, по данным фирмы «Плесси» (Англия).

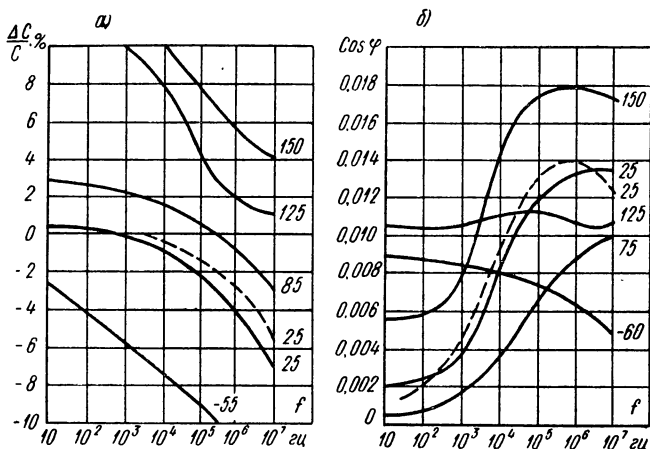


Рис. 54. Зависимость емкости и коэффициента мощности полиэтилентерефталатных конденсаторов от частоты при различных температурах

Сплошные кривые для майларовых конденсаторов (по Мистичу), пунктирные — для мелинексовых конденсаторов (по данным фирмы «Плесси»)

В диапазоне частот до $0,1 \text{ Мгц}$ и при температурах $20\text{—}85^\circ\text{C}$ изменения емкости невелики и не превосходят $2\text{—}3\%$; в диапазоне частот до 1 Мгц потери лежат ниже $0,010$ в области температурного минимума при $40\text{—}80^\circ\text{C}$; при 25°C , чтобы сохранить указанную цифру потерь, надо работать при частотах не выше 10 кгц , а при 150°C — не выше 1 кгц . Таким образом, можно считать, что потери в конденсаторах из пленки ПЭТФ несколько больше, чем у бумажных конденсаторов.

На рис. 55, а показаны данные о зависимости постоянной времени конденсаторов из пленки ПЭТФ от температуры. Разброс данных достаточно велик: от 3000 до $100\,000 \text{ сек}$; отчасти этот разброс вызван тем, что ряд кривых представляет собой браковочные данные фирм (например, кривые 4 и 7), в то время как другие кривые получены исследованием отдельных образцов повышенного качества; отчасти разброс может быть

вызван и различием в режимах сушки и запекания. Кроме того, наихудшие данные, по-видимому, относятся к металлизированным конденсаторам. Публикация 202 МЭК оговаривает для конденсаторов емкостью выше 0,33 мкф постоянную времени при 20° С не менее 10 000 сек и для конденсаторов с емкостью 0,33 мкф и ниже — сопротивление изоляции не ниже 30 000 Мом.

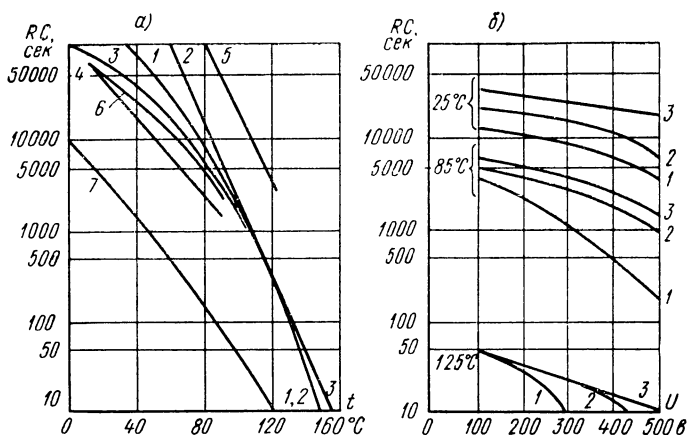


Рис. 55. Постоянная времени полиэтилентерфталатных конденсаторов: а — зависимость постоянной времени от температуры

1 — по Вули, Коману и Мак Магону (США); 2 — по Рокету (США); 3 — по Дэммеру (Англия); 4 — по каталогу фирмы «Дукати» (Италия); 5 — по каталогу фирмы «Конденсер Продэктс» (США); 6 — по Клементцу (Франция); 7 — по каталогу фирмы «Плесси» (Англия); б — зависимость постоянной времени от напряжения (по Мистичу); цифры у кривых указывают число слоев пленки 9 мкм между обкладками

В пределах температуры от 15 до 35° С для пересчета измеренных значений к 20° С рекомендуется формула:

$$R_{20} = R_t \cdot 2^{\frac{t-20}{15}}, \quad (20)$$

где R_t — сопротивление изоляции при температуре t и R_{20} — сопротивление изоляции при температуре 20° С. В логарифмическом виде получаем обычный характер зависимости от температуры:

$$\lg R_t = \lg R_{20} - \beta(t - 20), \quad (21)$$

где $\beta = 0,02$.

По величине постоянной времени и сопротивления изоляции конденсаторы из пленки ПЭТФ значительно превосходят обычные бумажные конденсаторы, а также конденсаторы с диэлект-

риком из пленок эфиров целлюлозы. Указанные здесь значения относятся к кратковременной выдержке под напряжением в течение 1—2 мин. Как показали Грэхем и Шмидт, увеличение времени выдержки приводит к значительному увеличению постоянной времени. При температуре 21° С и напряжении 87—260 в для диэлектрика $2 \times 6,25$ мкм («майлар») при фольговых обкладках и емкости 0,022 мкф они получили при выдержке под напряжением 70 сут. значение около 100 000 000 сек (ом·ф); при 75° С и времени около суток — примерно 400 000—800 000 сек; при 125° С постоянная времени лежала в пределах 150—300 сек и уже слабо возрастала с увеличением времени выдержки.

На рис. 55, б показана зависимость постоянной времени майларовых конденсаторов от напряжения при трех значениях температуры и различном числе слоев пленки между обкладками при толщине пленки 9 мкм. Для однослойных конденсаторов снижение RC с ростом напряжения заметно усиливается в сравнении с двух- и трехслойными, особенно при повышенных температурах.

Коэффициент абсорбции конденсаторов из пленки ПЭТФ значительно ниже, чем у бумажных, хотя и более высок, чем у конденсаторов с диэлектриком из неполярных пленок. По данным Мистича, для майларовых конденсаторов при 20° С, при $\tau_1 = 1$ мин, $\tau_2 = 1 \div 2$ сек и $\tau_3 = 0,5 \div 1$ мин величина k_a составляет 0,1%. Увеличивая значение τ_3 , можно получить до 0,4—0,5%. При пропитке полисилоксаном k_a возрастает до 2%. Для непропитанных конденсаторов k_a заметно возрастает с ростом температуры: от 0,1% при 0° С до 1% при 40° С и до 10% при 100° С. По отечественным данным, для непропитанных лавсановых конденсаторов при $\tau_1 = \tau_3 = 3$ мин и $\tau_2 = 5$ сек получены значения $k_a = 0,2—0,8\%$ при 20° С. По данным М. К. Чесновой, при 100° С значения k_a возрастают до 2,5—3%.

Хотя, как отмечалось выше, в отличие от бумаги пленка ПЭТФ имеет очень мало токопроводящих включений, все же в ней имеются слабые места, определяющие разброс пробивных напряжений как при испытании исходной пленки, так и изготовленных из нее конденсаторов.

Даже при толщине пленки 9—10 мкм при больших значениях емкости однослойные фольговые конденсаторы дают большое количество дефектных экземпляров, если не приняты специальные меры по обеспыливанию помещения, где ведется намотка. Вули, Коман и Мак Магон сообщали, что средняя пробивная напряженность однослойных фольговых конденсаторов емкостью 0,2 мкф при толщине пленки 22 мкм составляла 160—240 кВ/мм, а для более тонких пленок снижалась до 80 кВ/мм; это можно объяснить усилением влияния слабых мест при электродах большой площади. Те же авторы отмечают, что при $E = 24$ кВ/мм майларовые конденсаторы не дали ни одного

пробоя за 5000 ч работы при 130° С, после чего выдержали испытание 4000 ч при 150° С. Можно думать, что эти данные относятся к конденсаторам малой емкости. По данным Руби, при сроке службы однослойных конденсаторов с обкладками из фольги (толщина диэлектрика не указана) можно давать напряжение 250 в при 90° С, 100 в при 130° С и 75 в при 150° С.

По Мистичу кратковременное значение $E_{пр}$ при толщине пленки 25 мкм для однослойных конденсаторов равно 200—240 кВ/мм; при испытании непропитанных секций при $E = 26$ кВ/мм и 125° С в течение 250 ч было получено менее 10% пробоев. Эти данные далеко не так оптимистичны, как вышеприведенные данные Вули, Комана и Мак Магона. Для того чтобы перейти от срока службы 250 ч к 1000—10 000 ч, надо снизить напряженность, пользуясь известной зависимостью:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^n, \quad (22)$$

где, по Мистичу, $n=5$, а τ_1 и τ_2 — значения сроков службы при напряженностях поля E_1 и E_2 , соответственно. По данным Левенбаха, в зависимости от пределов E и температуры величина n может колебаться в пределах от 4 до 12. Клементц (1964 г.), как и Мистич, принимает $n=5$.

Для зависимости сроков службы майларовых конденсаторов от температуры Левенбах приводит формулу:

$$\log_{10} \frac{\tau_2}{\tau_1} = C \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (23)$$

где τ_1 и τ_2 — сроки службы при одном и том же напряжении и при температурах T_1 и T_2 , соответственно (абсолютная шкала). Здесь величина постоянного множителя C лежит в пределах 3000—8000.

Указанные выше значения $E_{раб}$, равные 24—26 кВ/мм для однослойных фольговых конденсаторов из пленки ПЭТФ, по видимому, соответствуют тщательно обеспыленному помещению. При наличии запыленности намоточного помещения при толщине пленки порядка 10 мкм и емкостях 0,1—1 мкф рабочее напряжение для таких конденсаторов при температуре 125° С опасно поднимать выше 100 в, что соответствует $E=10$ кВ/мм. При этом надо иметь в виду, что для намотки следует использовать отоженную алюминиевую фольгу, так как жесткая неотоженная фольга дает повышенное количество отходов из-за возможного прорезания пленки краями обкладок.

Несмотря на то, что при металлизации несколько ухудшится сопротивление изоляции конденсаторов из пленки ПЭТФ (хотя и в меньшей степени, чем для однослойных бумажных конденсаторов), все же при малых толщинах пленки надежность работы однослойного конденсатора заметно повышается при использовании тонких металлизированных обкладок; а

потому стремление к повышению удельной емкости конденсаторов из пленки ПЭТФ при использовании толщин пленки порядка 3,5—4 *мкм* способствовало быстрому расширению производства металлизированных конденсаторов этого типа. Пленка легко металлизировается, как и конденсаторная бумага, но технология упрощается, так как отпадает операция предварительной лакировки. Обычное значение сопротивления металлического слоя на пленке 1,5—2,5 *ом* на квадрат (для алюминия).

Для металлизированных конденсаторов из пленки ПЭТФ электрические свойства близки к свойствам конденсаторов с обкладками из фольги. Зависимость емкости и угла потерь от температуры носит один и тот же характер; частотная зависимость угла потерь должна ухудшиться при высоких частотах, но конденсаторы этого типа применяются, в основном, на низкой частоте или постоянном напряжении. Обычно норма на угол потерь как для фольговых, так и для металлизированных конденсаторов одна и та же; $\operatorname{tg} \delta$ не выше 0,01; только фирма «ЛТТ» (Франция) оговаривает несколько различные значения $\operatorname{tg} \delta$ у двух этих типов конденсаторов:

Тип конденсатора		фольговый	металлизированный
$\operatorname{tg} \delta$ при 50 <i>кГц</i>	0,0035	0,0050	
1 <i>кГц</i>	0,0070	0,0100	

Публикация 202 МЭК указывает одинаковую норму на постоянную времени обоих типов — 10 000 *сек*, но многие фирмы указывают для металлизированных конденсаторов при нормальной температуре только 3000—5000 *сек*.

Обычно полиэтилентерефталатные конденсаторы используются при постоянном напряжении, когда вопросы ионизационной стойкости не играют определяющего значения. При переменном напряжении из-за недостаточно высокой короностойкости пленки ПЭТФ необходимо принимать меры к устранению ионизации в рабочем режиме конденсатора. При изготовлении конденсаторов переменного напряжения представляет интерес патент¹, в котором предлагается использование комбинированных обкладок при изготовлении конденсаторов переменного тока из синтетических пленок, в частности из пленки ПЭТФ.

Согласно этому патенту синтетическая пленка металлизировается с обеих сторон, причем ширина металлизированного слоя берется меньше ширины пленки для образования изолирующих краев; при намотке секций между металлизированными лентами пленки помещаются ленты металлической фольги для уменьшения нагрева обкладок током. При этом ширина фольги должна быть несколько меньше, чем ширина металлизированного слоя, с таким расчетом, чтобы край фольги был перекрыт

¹ Пат. США, кл. 317—260, № 3271642, 04.11.1965, Л. В. Балдуин. См. также англ. пат., кл. H1M, № 1086348, 11.10.1967, Л. В. Балдуин.

тонким слоем металла на пленке. Выводы от обкладок осуществляются от фольги в виде вкладных контактов; может быть также использована конструкция с выступающей фольгой.

Пакет секций помещается в герметизированный корпус и заливается жидким диэлектриком. В качестве примера указано использование пленки «майлар» (ПЭТФ) толщиной 50 $\mu\text{м}$ и шириной 50 мм , покрытой слоем алюминия $25 \cdot 10^{-3} \mu\text{м}$ (сопротивление 1 ом на квадрат) с обеих сторон; закраина 3 мм ; прокладочная фольга алюминиевая толщиной 6,25 $\mu\text{м}$ и шириной 37,5 мм (ширина слоя металлизации $50 - (2 \times 3) = 44 \text{ мм}$); секции пропитаны жидким диэлектриком под вакуумом. Параллельно испытывались аналогичные секции, но без металлизации пленки. Емкость секций 0,03 $\mu\text{кф}$. Напряжение начала ионизации составляло 2400 в при частоте 60 гц .

Испытание проводилось при 2000 в , 60 гц , причем при включении происходило перенапряжение около 4000 в ; ежедневно напряжение трижды выключалось и включалось, после чего проверялась целостность предохранителей, защищающих образцы. При отсутствии металлизации все образцы вышли из строя в течение 16—300 ч ; при наличии металлизации образцы успешно проработали 7200 ч . В другом опыте сравнивались образцы, в которых ширина фольги была на 3 мм меньше ширины слоя металлизации, и образцы, в которых в отдельных местах фольга выступала до 3 мм за край металлизации; первые успешно проработали свыше 2 лет, а вторые пробились за первые 2 дня испытания, причем места пробоя были расположены у краев фольги, выступившей за края слоя металлизации.

Эффективное значение ϵ для майларовых фольговых конденсаторов, по Мистичу, равно 2,6, т. е. заметно ниже, чем для бумажных конденсаторов; для металлизированных конденсаторов из пленки ПЭТФ можно принимать ϵ порядка 3,2, но и это ниже, чем для бумаги. Тем не менее возможность применения пленки в один слой, снижение нижнего предела толщины пленки до 3,5 $\mu\text{м}$ (т. е. ниже, чем у бумаги), а также возможность повышения $E_{\text{раб}}$ особенно при повышенной температуре позволяет получать с помощью пленки ПЭТФ меньший удельный объем, чем в случае использования бумаги.

По данным 1962 г. при емкости 1 $\mu\text{кф}$ объем конденсаторов различных зарубежных фирм составлял (в $\text{см}^3/\mu\text{кф}$):

Американский металлизированный на	
100—200 в	7
300—400 в	12
600 в	24
Американский фольговый на 200 в	10
Итальянский фольговый на	
125 в	10
400 в	20
Французский фольговый на	
63 в	17
250 в	28

Характерно, что европейские фирмы при том же удельном объеме давали меньшие номинальные напряжения, чем американские; так, при удельном объеме 10 мкф/см^3 в США указывали $U_{\text{ном}}=200 \text{ в}$, а в Италии — 125 в ; при большем объеме французская фирма давала только 63 в . Наименьший удельный объем для американских конденсаторов составлял в то время около $3 \text{ см}^3/\text{мкф}$ при емкости 30 мкф . В настоящее время и европейские фирмы снизили удельные объемы конденсаторов из пленки ПЭТФ. Например, по каталогу французской фирмы «Преси» (1968 г.), при емкости 1 мкф объем зависит от напряжения так:

Напряжение, в	63	160	250	400	600
Объем, см^3	3	4,9	4,9	7,2	14,8

При напряжении 63 в изменение номинальной емкости дает следующее изменение удельного объема конденсаторов: $0,1 \text{ мкф} — 5,2 \text{ см}^3/\text{мкф}$; $1 \text{ мкф} — 3,0 \text{ см}^3/\text{мкф}$ и $10 \text{ мкф} — 1,7 \text{ см}^3/\text{мкф}$. Эти данные относятся к металлизированным конденсаторам уплотненного типа с толщиной пленки от 4 до 20 мкм .

По-видимому, в настоящее время европейские фирмы накопили достаточный опыт по производству этих конденсаторов и догнали США. Освоение производства конденсаторов из пленки ПЭТФ было связано с известными трудностями. Так, в работе Клементца, по данным одной из французских фирм, показано, как постепенно и медленно поднимался выход годных конденсаторов в период освоения производства; основную роль в деле улучшения качества сыграло введение тщательного пооперационного контроля. Это позволило снизить интенсивность отказов для двухслойных конденсаторов этой фирмы с обкладками из фольги до следующих значений: при номинальном напряжении 400 в и емкости $0,015—0,47 \text{ мкф}$, при 85°С — менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и при 125 в и $0,01—0,1 \text{ мкф}$ — менее $2 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$; удельный объем этих конденсаторов составлял $20,5 \text{ см}^3/\text{мкф}$ при 400 в и $7,6 \text{ см}^3/\text{мкф}$ при 125 в (при наибольших емкостях).

Для итальянских металлизированных конденсаторов емкостью $0,47 \text{ мкф}$ с номинальным напряжением 250 в , при температуре 85°С и номинальном напряжении $\lambda=1 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, что согласуется с приведенными выше данными для французских фольговых конденсаторов, показывая, что однослойные металлизированные конденсаторы имеют не меньшую надежность, чем двухслойные фольговые.

По данным фирмы «СЭЛ» (ФРГ), для конденсаторов из пленки ПЭТФ серии МКТ при напряжении 100 в и емкости 10 мкф размеры корпуса составляют $21,5 \times 31,5 \text{ мм}$, что дает удельный объем $1,15 \text{ см}^3/\text{мкф}$. При столь малом объеме, очевидно, использована пленка толщиной $3,5—4 \text{ мкм}$: при напряжении 100 в это дает $E_{\text{раб}}=25—28 \text{ кВ/мм}$, а при напряжении 63 в — $15—18 \text{ кВ/мм}$.

В настоящее время в США цена пленки ПЭТФ снижена так, что стоимость конденсаторов из этой пленки уже или равна стоимости аналогичных бумажных, или даже несколько ниже. При этом сказывается также упрощение технологии и конструкции конденсатора из пленки ПЭТФ, что также способствует его удешевлению. Кроме того, надо учесть, что, заменяя пленку бумагой, мы получаем также повышение нагревостойкости конденсатора и улучшение таких его электрических свойств, как постоянная времени и коэффициент абсорбции, при одновременном сокращении размеров и веса конденсатора.

До сих пор мы рассматривали непитанные запеченные конденсаторы из пленки ПЭТФ. Такие конденсаторы рассчитаны в основном на использование при постоянном напряжении ограниченной величины, до 600—1000 в. Допустимая переменная составляющая напряжения ограничивается для таких конденсаторов как опасностью ионизации в связи с наличием в диэлектрике остаточного воздуха, так и опасностью нагрева вследствие относительно больших потерь, заметно возрастающих с частотой. На рис. 56, по данным одной из зарубежных фирм, показана зависимость допускаемого эффективного значения переменного напряжения от частоты для полиэтилентерефталатных конденсаторов

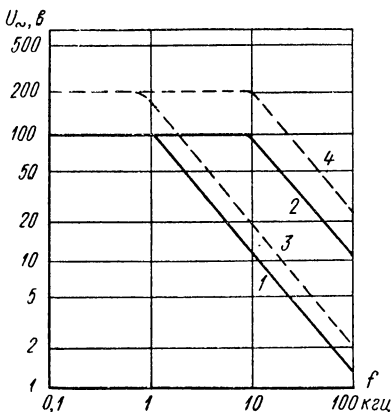


Рис. 56. Допускаемая величина переменной составляющей пульсирующего напряжения (эффективные значения) в зависимости от частоты для полиэтилентерефталатных конденсаторов

1 — $U_{\text{ном}} = 125$ в, $C_{\text{ном}} = 1$ мкф; 2 — 125 в, 0,047 мкф; 3 — 400 в, 0,47 мкф; 4 — 400 в, 0,01 мкф

1 — $U_{\text{ном}} = 125$ в, $C_{\text{ном}} = 1$ мкф, кривая 2 — 0,047 мкф, кривая 3 — 0,47 мкф и кривая 4 — 0,01 мкф.

Для изготовления полиэтилентерефталатных конденсаторов на повышенное переменное напряжение или на высокое постоянное напряжение требуется проводить их пропитку, которая, как уже отмечалось выше, связана с трудностями особенно при увеличенных размерах секций. Поэтому широкое распространение получили комбинированные конденсаторы с диэлектриком из пленки ПЭТФ и бумаги, пропитка которых происходит без всяких затруднений. Эти конденсаторы мы рассмотрим ниже (§ 22).

Вместе с тем проводятся попытки изготавливать пропитанные полиэтилентерефталатные конденсаторы и без использования

промежуточных бумажных прокладок, которые, видимо, дают иногда удачные результаты. Так, фирма «Таййо Коммуникейшн» (Япония) сообщила о выпуске полиэфирных конденсаторов, пропитанных под вакуумом полиизобутиленом или полисилоксаном. Номинальная емкость — от 0,2 до 2 мкф; номинальное постоянное напряжение от 1,5 до 20 кВ; пределы рабочей температуры от -30 до $+85^{\circ}\text{C}$. Интересно отметить сообщение фирмы о том, что до пропитки предварительно накладывается полисилоксановый лак (может быть, не лак, а вязкий состав типа вазелина).

Идея смазывания пленки мазеподобным составом, например полисилоксановым вазелином, при изготовлении полиэтилен-рефталатных конденсаторов известна и была использована не столько для получения конденсаторов с повышенным рабочим напряжением, сколько для получения намотанных конденсаторов с пониженным ТКЕ термокомпенсированного типа. В этом случае положительный температурный коэффициент пленки в сочетании с отрицательным температурным коэффициентом полисилоксана, заполняющего зазоры между слоями пленки и между пленкой и обкладками из металлической фольги, позволяют получить эффект термокомпенсации и обеспечить стабильность емкости при колебаниях температуры.

Однако, как показали данные Г. Р. Демиденко и Е. Б. Кравчинской, термокомпенсация осуществляется только в относительно узкой области температур, от 20 до 80°C ; в этой области разброс ТКЕ для однотипных конденсаторов составляет от 50 до $125 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Величина $\text{tg } \delta$ конденсаторов при частотах до 1000 гц не превышает $0,006$, но с ростом частоты начинает возрастать, что ограничивает возможность применения таких конденсаторов при высоких частотах.

Изготовление пропитанных конденсаторов из пленки ПЭТФ описано также в работе Хэйурта (1968 г.) применительно к новому типу накопительного конденсатора, изготавливаемому Максвелловской лабораторией (США). Многослойные конденсаторные секции из пленки ПЭТФ толщиной от $3,75$ до 50 мкм , не содержащие прослойки бумаги, пропитывались жидким диэлектриком из класса фосфатных эфиров при специально разработанном процессе пропитки с чередованием вакуума и давления при определенных значениях температуры и продолжительности циклов. Автор отмечает, что разработка процесса пропитки потребовала значительных усилий и позволяла пропитывать секции с запасом энергии не более 1 дж .

При испытании секций емкостью 13 мкф , с толщиной диэлектрика 19 мкм , при зарядном напряжении 4 кВ ($E = 210 \text{ кВ/мм}$) 90% образцов выдержало около $150\,000$ разрядов (апериодических) на сопротивление 1 ом при повторяемости разрядов 5 раз в секунду. Продолжение этого испытания показало, что при увеличении суммарного числа разрядов до

250 000 оставались работоспособными еще 10% образцов. Средний срок службы, соответствующий вероятности пробоя 50%, составил 200 000 разрядов. Дополнительные испытания секций с толщиной диэлектрика 11,5 и 26,5 $\mu\text{м}$ (также многослойных) показали, что срок службы конденсаторов прямо пропорционален $d^{3,5}$, где d — толщина диэлектрика. Испытания таких же секций с добавлением многослойных секций с увеличенной толщиной диэлектрика (37,5 $\mu\text{м}$) показали, что срок службы обратно пропорционален величине напряжения в степени 7,5, т. е.:

$$\tau = AU^{-n}, \quad (24)$$

где A — постоянная и $n=7,5$ (а не 5, как обычно принимают); величина τ характеризуется числом разрядов, которые выдерживает конденсатор. Сопоставляя результаты испытания, можно было прийти к выводу о том, что срок службы зависит как от напряжения U , так и от напряженности поля E , причем:

$$\tau \equiv E^{-3,5}U^{-4}. \quad (25)$$

Отсюда вытекает, что оптимальная конструкция конденсатора должна содержать много последовательно включенных секций с относительно небольшим напряжением. Например, если конденсатор на 20 кв , собранный из 4 секций (по 5 кв на секцию), заменить конденсатором, собранным из 8 секций (при том же значении напряженности поля), т. е. снизить напряжение на секцию до 2,5 кв , то срок службы должен увеличиться в отношении $(U_1/U_2)^4$, т. е. в 16 раз.

При испытании аналогичных конденсаторов в условиях периодического разряда с величиной обратного напряжения 75%, при зарядном напряжении 5 кв и частоте разряда 30 кГц , при повторяемости разрядов 1 раз в секунду, для многослойного диэлектрика 19 $\mu\text{м}$ и емкости секции 10 $\mu\text{кФ}$ ($E=265 \text{ кВ/мм}$) были получены следующие данные: 90% секций выдержало 1000 разрядов, а после 2000 разрядов осталось целыми только 10%; вероятность пробоя 50% соответствовала примерно 1500 разрядов.

Испытания, проведенные с толщинами диэлектрика 19; 26,5 и 57 $\mu\text{м}$, подтвердили применимость формулы (25) и для случая периодического разряда.

При частоте 200 кГц было проведено исследование зависимости срока службы при периодических разрядах от отношения обратной амплитуды напряжения к первой прямой амплитуде, выраженного в процентах. На основании полученных данных построена кривая, изображенная на рис. 57, а, показывающая зависимость коэффициента, на который надо умножить срок жизни, соответствующий 75% обратной амплитуде, при других

значениях этой амплитуды. Кривая на рис. 57, а может использоваться в диапазоне частот от 200 до 10 кГц, поскольку в этом диапазоне влияние изменения обратной амплитуды мало зависит от частоты. Следует отметить, что величина обратной амплитуды сильно влияет на срок службы (число импульсов, которое выдерживает конденсатор): уменьшение ее от 75 до 25 % от первой прямой амплитуды, т. е. в три раза, увеличивает срок службы примерно в 10 раз. Автор отмечает, что конденсаторы могут работать при значениях удельной энергии 320—640 $\text{дж}/\text{дм}^3$ и оптимальных значениях зарядного напряжения,

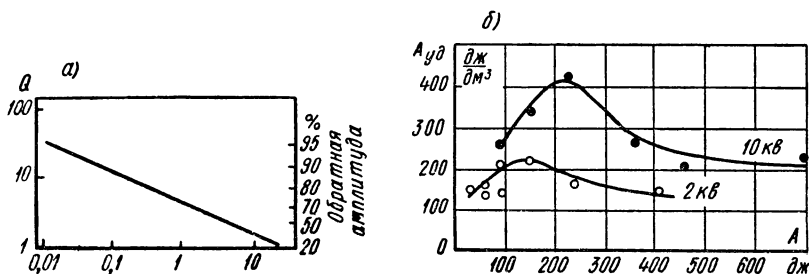


Рис. 57. Характеристики пропитанных полиэтилентерефталатных конденсаторов фирмы «Максвелл Лаборатори»: а — зависимость между добротностью контура (при 200 кГц), обратной амплитудой и сроком службы, выраженным в виде отношения к сроку службы при обратной амплитуде 75%; б — зависимость удельной энергии от номинальной энергии конденсатора при двух значениях номинального напряжения

при которых использование диэлектрика оказывается наиболее выгодным.

По данным каталога Максвелловской лаборатории, конденсаторы изготавливаются с фольговыми выступающими с торцов обкладками и собираются в цилиндрических корпусах с одним изолированным выводом. Номинальная емкость — от 1,8 до 210 мкф , номинальное напряжение — от 2 до 12 кВ, запасаемая энергия — от 40 до 700 дж ; допускаемое отклонение емкости от номинала $\pm 10\%$, ток — до 25 000 а, допускаемое число разрядов в секунду — от 10 до 100; $\text{tg } \delta$ — менее 0,010; индуктивность порядка $5\text{—}10 \cdot 10^{-9}$ гн. Минимальный гарантируемый срок службы (при надежности 95%) составляет 50 000 разрядов при обратной амплитуде 50% и 5000 разрядов при обратной амплитуде 80%.

Используя размеры и номинальные данные каталога, можно было определить реальные значения удельной энергии данного типа конденсатора при гарантируемом фирмой сроке службы. Эти значения для двух номинальных напряжений, 2 и 10 кВ, показаны на рис. 57, б в зависимости от номинальной энергии

конденсаторов. Как следует из рисунка, оптимальные значения удельной энергии зависят не только от напряжения, но и от номинальной энергии (т. е. и от емкости) конденсатора. Судя по этим данным, указанные в каталоге значения $A_{уд} = 320 \div 640 \text{ дж/дм}^3$ можно получить лишь для отдельных типономиналов конденсаторов при оптимальных сочетаниях емкости и зарядного напряжения. Более характерным значением $A_{уд}$ для данного типа конденсатора, по-видимому, следует считать $100\text{—}200 \text{ дж/дм}^3$, что уже приближается к тем значениям, которые можно получать для бумажно-пленочных и даже чисто бумажных конденсаторов.

Тем не менее возможность получения даже для отдельных наивыгоднейших сочетаний емкости и напряжения значений удельной энергии, достигающей 640 дж/дм^3 , представляется весьма интересной, так как эти значения превосходят то, что удастся получить в электролитических конденсаторах, которые при напряжениях до 500 в давали значения удельной энергии $300\text{—}400 \text{ дж/дм}^3$, что считалось рекордным значением. Столь большие запасы энергии в единице объема достигаются за счет использования высоких значений напряженности электрического поля, приближающихся к значениям кратковременной прочности.

При оценке этих данных надо иметь в виду, что по каталогу фирмы в данном случае номинальное напряжение соответствует гарантированному сроку службы при непрерывном действии постоянного напряжения данной величины (т. е. 5 кв) не менее 2 ч .

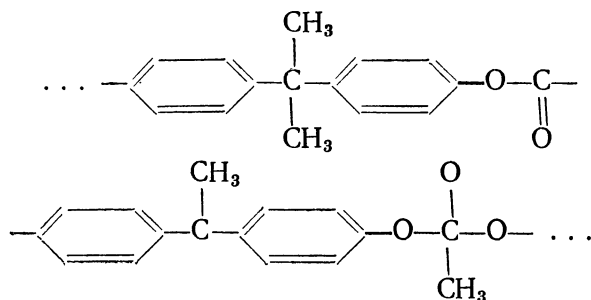
Если пересчитать число допускаемых для этого конденсатора импульсов периодического разряда на промежуток времени, то получается гарантированный срок службы в импульсном режиме не менее 30 сек . Таким образом, указанная выше высокая напряженность характеризует весьма форсированный, но кратковременный режим работы. Тем не менее этот пример показывает, что пленка ПЭТФ может с успехом применяться взамен бумаги не только при малых, но и при относительно высоких напряжениях.

§ 18. Поликарбонатная пленка и поликарбонатные конденсаторы

Поликарбонатная пленка представляет собой относительно новый диэлектрик в конденсаторостроении; однако применение этой пленки быстро растет во многих странах.

Поликарбонаты — это полиэфиры угольной кислоты, $O=C(OH)_2$, полученные при замещении гидроксильных радикалами, представляющими собой остатки молекул спиртов или кислот. Практическое применение в качестве диэлектрика нашел себе поли-4,4-диоксифенил-2,2-пропанкарбонат; структура

молекулы этого полимера имеет вид:



Первые сведения о производстве электроизоляционной пленки из этого полимера под названием «макрофоль», были сообщены фирмой «Байер» (ФРГ) в 1958 г.

По данным Мак Магона и Уихи (1964 г.), в США были опробованы также поли-4,4'-изопропилидендифенолкарбонат и поли-4,4'-норборнилидендифенолкарбонат, причем оказалось, что второй из них имел заметно улучшенные электрические характеристики. В последнем каталоге фирмы «Байер» сообщается, что фирма изготавливает 4 сорта пленки: «макрофоль-*N*» — нормальная литая пленка толщиной от 20 до 200 мкм, золотисто-желтая; «макрофоль-*G*» — литая и продольно вытянутая (ориентированная) пленка толщиной от 10 до 100 мкм, также золотисто-желтая; «макрофоль-*KG*» — литая кристаллизованная и продольно вытянутая пленка толщиной от 2 до 60 мкм, желто-зеленая; «макрофоль-*E*» — экструдированная пленка толщиной от 200 до 500 мкм, неокрашенная. Фирменные данные о свойствах сортов литых пленок даны в табл. 11.

Для экструдированной пленки *E* данных не приводится, но отмечается, что они примерно близки к данным для пленки *N*. Для производства конденсаторов предназначается пленка *KG*, обладающая наиболее высокой механической прочностью и наилучшими электрическими свойствами, если не считать несколько сниженной диэлектрической проницаемости. По механической прочности эта пленка, как и пленка ПЭТФ, превосходит конденсаторную бумагу, что позволило в последнее время снизить нижний предел толщины пленки поликарбоната до 2 мкм.

В табл. 11 для пленки *KG* при комнатной температуре указана величина $E_{\text{пр}}$, равная 180 кВ/мм. Вместе с тем в этом же каталоге приводятся данные об устойчивости пленки *KG* при длительном нагреве при 140°С по изменению величины $E_{\text{пр}}$, измеренной при 20°С, показывающие более высокие значения $E_{\text{пр}}$, около 350—355 кВ/мм; после старения при 140°С в течение 5376 ч эта величина снизилась до 330 кВ/мм. Можно думать, что эти данные получены для пленки меньшей толщины, чем у тех образцов, для которых получены данные табл. 11.

Наименование характеристики	Сорта пленки		
	N	G	KG
Плотность, $г/см^3$	1,20	1,20	1,21
Временное сопротивление разрыву, $кг/см^2$	800—900	1300—1400	2200—2400
Удлинение, %	100—120	50—60	30—40
Длительная нагревостойкость, $^{\circ}C$	130—140	130—140	140
Гигроскопичность при выдержке в воде 24 ч, %	0,5	0,5	0,3
Пробивная напряженность после 4 сут. при влажности 80%, $кв/мм$	170 (4—200 $мкм$)	170 (20 $мкм$)	180 (20 $мкм$)
Удельное поверхностное сопротивление (после 4 сут. при влажности 80%), $ом$	$1 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$
Удельное объемное сопротивление, $ом \cdot см$;			
в сухом виде	$1 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$
после 4 сут. при 80% влажности	$4 \cdot 10^{16}$	$9 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$
после 24 ч в воде	$3 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$
Диэлектрическая проницаемость в сухом виде при частоте:			
50 $гц$	3,1	2,9	2,8
800 $гц$	3,0	2,9	2,8
1 $Мгц$	2,9	2,8	2,7
$tg \delta$ в сухом виде при частоте:			
50 $гц$	$25 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$
800 $гц$	$20 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
1 $Мгц$	$87 \cdot 10^{-4}$	$95 \cdot 10^{-4}$	$30 \cdot 10^{-4}$

По данным Тернера, при толщине 12 $мкм$ величина $E_{пр}$ составляет 360 $кв/мм$.

По данным Геннингена, гигроскопичность поликарбонатной пленки составляет 0,6%, а коэффициент влагопроницаемости равен $6 \cdot 10^{-10}$ $г/ч \cdot см \cdot торр$; влияние влажности на электрические свойства относительно невелико, как показывает табл. 12.

Таблица 12

Сорт пленки не указан; возможно, для современной пленки KG результаты могут быть даже несколько лучше, чем в этой таблице. Для коэффициента расширения поликарбонатной

пленки можно найти в литературе значение $70 \cdot 10^{-6}$ $град^{-1}$. Усадка после прогрева при $150^{\circ}C$ указывается равной 1,5%.

Относительная влажность воздуха, %	при ϵ кгц	$tg \delta$ при 1 кгц	$\rho_{об}$, $ом \cdot см$
0	3,0	0,0012	10^{17}
50	3,0	0,0020	10^{16}
80	3,2	0,0025	10^{16}

Поликарбонатная пленка начала быстро внедряться в современное конденсаторостроение, причем вначале как западноевропейские страны, так и США использовали пленку, импортируемую из ФРГ. Теперь в США также начато изготовление этой пленки под названием «лексен». В Англии и во Франции, по видимому, еще применяется импортный «макрофоль». Поликарбонатная пленка не уступает полиэфирной пленке ПЭТФ по

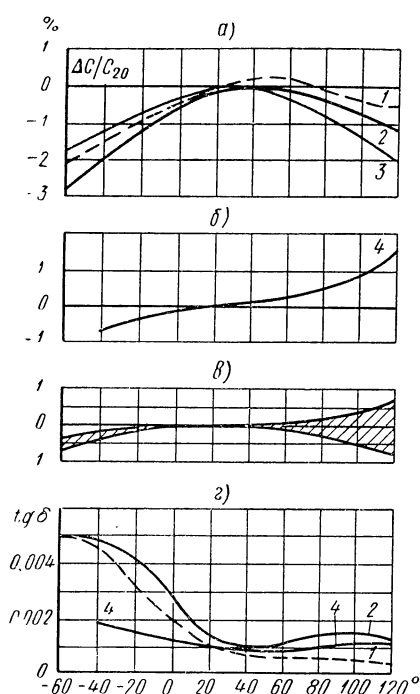


Рис. 58. Зависимость емкости (а, б, в) и угла потерь (г) поликарбонатных конденсаторов от температуры

механической и электрической прочности, а по величине $\text{tg } \delta$ и стабильности емкости конденсаторов дает значительно лучшие результаты. По нагревостойкости обе пленки примерно равноценны. В начале производства поликарбонатных конденсаторов нижний предел толщины пленки был выше, чем у пленки ПЭТФ, и удельные характеристики получались хуже, чем для полиэтилентерефталатных конденсаторов. При равных толщинах диэлектрика удельная емкость поликарбонатного конденсатора должна быть снижена за счет несколько меньшей диэлектрической проницаемости пленки (ϵ ПЭТФ — 3,2; ϵ ПК марки КГ — 2,8); однако при малых напряжениях, когда можно применить толщину 2 мкм, величина $C_{\text{уд}}$ в случае поликарбоната будет уже выше, чем для ПЭТФ.

В первый период освоения производства поликарбонатных конденсаторов сообщались весьма противоречивые данные о величине их ТКЕ: от -100 до $+350 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$. Современные данные о зависимости емкости и угла потерь поликарбонатных конденсаторов от температуры при частоте 1 кГц показаны на рис. 58. В верхней части рис. 58, а кривая 1 относится к конденсаторам, изготовленным в ФРГ, кривая 2 — к японским конденсаторам и кривая 3 — к французским фирмы «ЛТТ»; все три кривые хорошо согласуются: в области низких температур, ниже $20-40^\circ \text{C}$, ТКЕ имеет положительный знак и составляет $+(200 \div 300) \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$; при более высоких температурах он меняет знак на отрицательный, и разброс ТКЕ оказывается больше: от -75 до $-250 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$. Все эти кривые относятся, по-ви-

димому, к конденсаторам с обкладками из фольги. На рис. 58, б приведена кривая 4 для металлизированного поликарбонатного конденсатора фирмы «СЭЛ» (ФРГ); в этом случае во всей исследованной области температур ТКЕ имеет положительный знак и равен $+120 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$.

Отсюда, однако, не надо делать вывода о том, что такая форма кривой присуща именно металлизированным конденсаторам; на рис. 58, в показан разброс температурной зависимости емкости для конденсаторов французской фирмы «Преси» с обкладками из фольги. Здесь видно, что для однотипных конденсаторов могут иметь место обе зависимости, показанные на рис. 58, а и б. Эта фирма указывает среднее значение ТКЕ, равное $\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$ для $t > 20^\circ \text{C}$. Кривые, изображающие на рис. 58, г зависимость угла потерь от температуры, имеют нумерацию, соответствующую нумерации кривых для емкости в верхней части рисунка. Кривые 1 и 2 имеют сходную форму, а кривая 4 показывает пониженные потери в области низких температур; возможно, что эта кривая получена не при 1 кГц, а при 50 Гц.

Большинство фирм дают норму на величину угла потерь для поликарбонатных конденсаторов при 20°C и частоте 1 кГц: $\text{tg } \delta \leq 20 \cdot 10^{-4}$. Фирма «Плесси» (Англия) указывает также дополнительные нормы: при частоте 1 кГц и температуре 150°C и при частоте 1 МГц и 20°C ; в обоих случаях $\text{tg } \delta \leq 100 \cdot 10^{-4}$. По данным фирмы «СЭЛ» (ФРГ), для металлизированных конденсаторов при емкости, равной или меньшей 0,33 мкФ, величина $\text{tg } \delta$ должна быть не более $15 \cdot 10^{-4}$, а при больших емкостях — не более $25 \cdot 10^{-4}$.

Различный характер кривых $C=f(t)$ на рис. 58 и разброс ТКЕ, по-видимому, в первую очередь определяются различием в режимах запекания. В этом случае могут играть роль как различия в температуре и времени выдержки, так и различия в конструкции конденсаторных секций (цилиндрические или плоскопрессованные, степень натяжения при намотке и степень сжатия при прессовке, толщина диэлектрика и т. п.). О режиме запекания в литературе можно найти противоречивые данные, возможно, связанные также с различием в размерах и конструкции конденсаторов, которые обычно не указаны. Так, Гофмейер рекомендует температуру запекания 160°C , тогда как, по мнению Мак Лина, Уихи и Данте, это значение очень высоко: при 165°C они наблюдали много случаев закорачивания образцов, при температуре запекания 150°C величина $E_{\text{пр}}$ была недостаточно велика — 28—64 кВ/мм, понижение температуры запекания до 135°C повысило $E_{\text{пр}}$ до значения 64—144 кВ/мм; эти авторы рекомендовали температуру запекания для плоскопрессованных секций, сжатых при давлении 0,15 кГ/см², равную 120°C при выдержке 2 ч; при таком режиме была получена пробивная напряженность запеченных секций 240—260 кВ/мм.

По более новым американским данным¹ рекомендуется вести запекание при 140°C в течение 16 ч, применяя последующее охлаждение до 20°C в среде сухого азота; при этом верхний предел рабочей температуры конденсаторов указывается равным 150°C ; конструкция конденсаторов не оговорена.

В большинстве случаев зарубежные фирмы, выпускающие поликарбонатные конденсаторы, указывают для них номинальное напряжение при температуре 85°C ; обычное предельное значение температуры 125°C при значительном снижении напряжения иногда на 50%, как, например, у фирмы «ЛСС» (Франция) для металлизированного варианта; в отдельных случаях верхний предел повышается до 150°C или снижается до 100°C . Значение 150°C указано фирмой «Плесси» (Англия) для конденсаторов, герметизированных в стеклянных трубках. Нижний предел рабочей температуры обычно указывается равным $55 \div 60^{\circ}\text{C}$, реже 40°C .

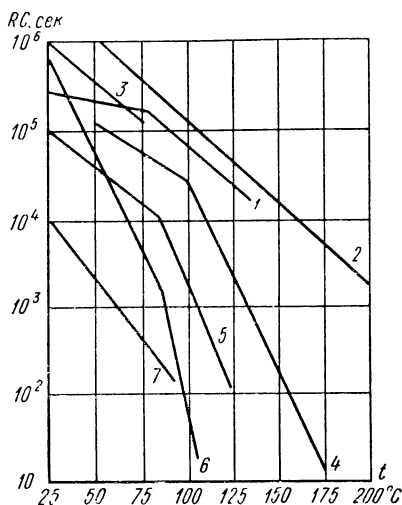


Рис. 59. Зависимость постоянной времени от температуры для различных типов пленочных конденсаторов (по Лампье)

1 — поликарбонатный конденсатор; 2 — политетрафторэтиленовый; 3 — полистирольный; 4 — полипирометиллитимидный; 5 — полиэтилентерефталатный; 6 — полипропиленовый; 7 — триацетатный

✓ Постоянная времени у поликарбонатных конденсаторов обычно выше, чем у полиэфирных (ПЭТФ); по данным Лампье, по этой характеристике поликарбонатные конденсаторы, по существу, уступают лишь политетрафторэтиленовым, а также полистирольным (при умеренных температурах) и превосходят все остальные пленочные конденсаторы, даже нагревостойкие конденсаторы из полиимидной пленки (рис. 59). Обычная норма, указываемая зарубежными фирмами, на постоянную времени поликарбонатных конденсаторов при 20°C равна 10^4 сек ; фирма «ЛСС» оговаривает снижение постоянной времени до 500 сек при 85°C и до 50 сек при 125°C ; фирма «САМ» (Франция) для металлизированных конденсаторов дает норму 3000 сек; фирма «Плесси» для конденсаторов в стеклянных трубках с обкладками из фольги указывает постоянную времени при 20°C , равную $2,5 \cdot 10^5 \text{ сек}$, при 85°C — $1,5 \cdot 10^5 \text{ сек}$ и при 125°C — $2 \cdot 10^4 \text{ сек}$; эти цифры, очевидно, не являются браковочной нормой. Величину 10^5 сек при

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 3328654, 27.06.1967, Дж. Д. Вилльсон.

20°С указывает также фирма «Ниппон Хемикэл Конденсер» (Япония). Фирма «Спрейг» (США) указывает для металлизированных конденсаторов верхний предел температуры, равный 105°С, а для фольговых конденсаторов 125°С; при этом значении температуры постоянная времени указана равной 500 сек.

Допуск по емкости указывается весьма различным, начиная от $\pm 20\%$ и кончая ± 1 и даже $\pm 0,25\%$; в отношении стабильности емкости во времени в литературе сколь-нибудь надежных данных не указано, но, судя по нижнему пределу применяемых допусков, при тщательном изготовлении конденсаторов изменения емкости во времени, вероятно, не превосходят нескольких десятых процента.

✓ Как указывалось выше, гигроскопичность поликарбонатной пленки мала и ее электрические свойства относительно мало изменяются при воздействии влажности, однако длительное пребывание при высокой влажности уже может оказать существенное влияние. Поэтому наряду с уплотненными конструкциями поликарбонатных конденсаторов (опрессовка термопластичной массой, окукливание и т. п.) приходится применять и герметизированные конструкции, если к стабильности электрических свойств предъявляются повышенные требования. Изменения постоянной времени, угла потерь и емкости поликарбонатной незащищенной секции при изменениях влажности окружающей среды были изучены в США. Испытания проводились в следующих режимах: 1 — исходное сухое состояние; 2 — выдержка при влажности 98% и температуре 25°С при отсутствии напряжения; 3 — секция высушена и запечена в вакууме, хранится в сухих условиях, без напряжения; 4 — выдержка в условиях влажности 98% при 25°С и при воздействии напряжения 100 в; 5 — секция высушена, запечена в вакууме и хранится в сухих условиях. Режим запекания — 2 сут. в вакууме при 65°С. Полученные результаты показали, что в условиях высокой влажности незащищенные секции могут увеличивать емкость на 6—8%, т. е. достаточно заметно; постоянная времени до запекания снижается во влажности больше, чем на два порядка, но после запекания приобретает большую устойчивость, и в тех же условиях влажности снижается только на один порядок величин. Характерно, что угол потерь после увлажнения сохраняет необратимое ухудшение.

Таким образом, можно полагать, что по влагоустойчивости поликарбонатные конденсаторы уступают полистирольным и даже при обычных условиях применения не могут успешно работать в виде открытых секций, защищенных только запеканием, а требуют специальной влагозащиты.

Хотя поликарбонат имеет заметно пониженный угол потерь по сравнению с ПЭТФ и может рассматриваться как слабополярный диэлектрик, все же по величине угла потерь он значительно хуже полистирола и других неполярных полимеров,

особенно в области повышенных и высоких частот, где потери у поликарбоната приближаются к потерям в полиэфирах типа ПЭТФ (рис. 60). По величине коэффициента абсорбции поликарбонатные конденсаторы также уступают полистирольным, хотя и несколько превосходят полиэтилентерефталатные (табл. 7). Вместе с тем поликарбонат позволяет по сравнению с полистиролом получить значительное повышение верхнего предела рабочей температуры и заметно снизить объем конденсаторов при заданной емкости.

По сравнению с пленкой ПЭТФ по ряду данных можно установить ухудшение удельных характеристик для конденсаторов

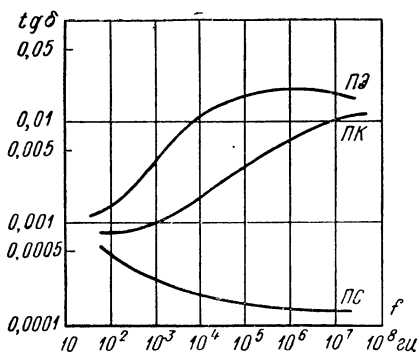


Рис. 60. Зависимость угла потерь трех пленочных диэлектриков от частоты: ПЭ — полиэтилентерефталат; ПК — поликарбонат; ПС — полистирол

из поликарбонатной пленки, как, например, по данным французской фирмы «Преси»; однако при этом указаны минимальные значения толщин пленок: 4 мкм для ПЭТФ и 6 мкм для поликарбоната. Выше уже отмечалось, что при емкости 10 мкф для металлизированного конденсатора из пленки ПЭТФ при напряжении 63 в можно получить 1,7 мкф/см³, что дает удельный заряд 108 мкк/см³. Для металлизированной поликарбонатной пленки при современном значении нижнего предела толщины 2 мкм можно получать до 2 мкф/см³, т. е.

даже более высокую удельную емкость, чем для пленки ПЭТФ.

Таким образом, по удельным характеристикам современные конденсаторы из поликарбонатной пленки не уступают полиэтилентерефталатным, а по электрическим — заметно их превосходят. В некоторых зарубежных работах даже обсуждается вопрос о возможности вытеснения пленки ПЭТФ поликарбонатной пленкой из конденсаторостроения.

Судя по данным § 2 и табл. 1, при использовании поликарбоната, содержащего относительно малое количество кислорода в молекуле, можно ожидать трудностей при его металлизации, так как процесс самовосстановления при пробое должен был быть менее совершенным, чем при бумаге, эфирцеллюлозных пленок и пленки ПЭТФ¹. Однако эти опасения, по-видимому,

¹ В 1970 г. фирма «Байер» сообщила, что неудовлетворительная способность к самовосстановлению при пробое наблюдалась только при металлизации некристаллизованных поликарбонатных пленок в отличие от кристаллизованной пленки КГ. Это ставит под сомнение теорию Каммермайера, поскольку при кристаллизации содержание кислорода в молекуле не меняется.

оказались преувеличенными, поскольку большинство зарубежных фирм, изготавливающих поликарбонатные конденсаторы, рекламируют как конденсаторы с обкладками из фольги, так и металлизированные. Металлизируют конденсаторы алюминием.

Необходимо отметить, что, судя по работе, опубликованной Бэном (1968 г.) в ФРГ, кроме намотанных поликарбонатных конденсаторов начато изготовление малогабаритных конденсаторов для печатных схем, которые собираются из прямоугольных кусочков поликарбонатной пленки, металлизированной алюминием, наподобие слюдяных конденсаторов из металлизированной слюды. Стопка из таких кусочков, собранных так, что металлизированные обкладки одного знака сдвинуты к одному торцу собранной стопки (секции конденсатора), а обкладки другого знака сдвинуты к противоположному торцу, подвергается горячей прессовке, при которой выжимается воздух из зазоров между пленками и гладкие поверхности пленок плотно сцепляются за счет действия сил Ван дер Ваальса. На торцы, где выступают края металлизированных обкладок, напыляется контактный слой металла, к которому припаиваются выводные проводники. Секция обертывается защитной изоляционной пленкой, края которой несколько выступают за края секции, пленка заклеивается, а открытые торцы секции заполняются влагозащитным лаком. Эта конструкция может быть отнесена к климатическому классу *G* по нормам ФРГ (VDE 0560 часть 21).

Бен отмечает, что преимуществом этой конструкции является улучшенное контактирование по сравнению с намотанным типом конденсатора. В последнем при нанесении контактного слоя на торцы секции не все витки оказываются присоединенными к торцевому контакту, что приводит к увеличению пути тока по обкладке и возрастанию потерь. В новой конструкции можно гарантировать, что обкладка каждого листка пленки будет присоединена к торцевому контакту. Уменьшено также переходное сопротивление от торцевого контакта к выводному проводнику.

Для расчета потерь в обкладках данного типа конденсатора Бен приводит следующее выражение:

$$(\operatorname{tg} \delta)_{\text{обк}} = \frac{4}{3} \frac{\omega \varepsilon b}{\sigma d} \left(1 + 3 \frac{\Delta b}{b} \right). \quad (26)$$

Здесь ω — угловая частота; ε — диэлектрическая проницаемость пленки; d — толщина пленки; b — активная ширина обкладки; Δb — разница между полной шириной обкладки и ее активной шириной и σ — удельная проводимость обкладки.

Составляющая угла потерь конденсатора, обусловленная потерями в обкладке, подсчитанная по этой формуле в зависимости от частоты, показана пунктиром на рис. 61, *a*. Сплошная кривая на этом рисунке соответствует полному значению угла потерь конденсатора с учетом потерь и в диэлектрике. Влияние потерь в обкладках, судя по этому рисунку, начинает сказываться

ваться при частотах выше 10 кГц. Улучшение торцевого контакта в этом конденсаторе дает ему возможность легче выдерживать толчки тока при воздействии импульсов напряжения с крутым фронтом выше 100 в/мксек.

Для конденсаторов данного типа установлена хорошая самовосстанавливаемость при пробое. На рис. 61, б показано изменение емкости (1) и угла потерь (2) при ступенчатом повышении напряжения, прикладываемого к конденсатору, с измерением электрических характеристик после каждой ступени. При номинальном напряжении 250 в снижение емкости, связанное с уменьшением площади обкладок при систематических про-

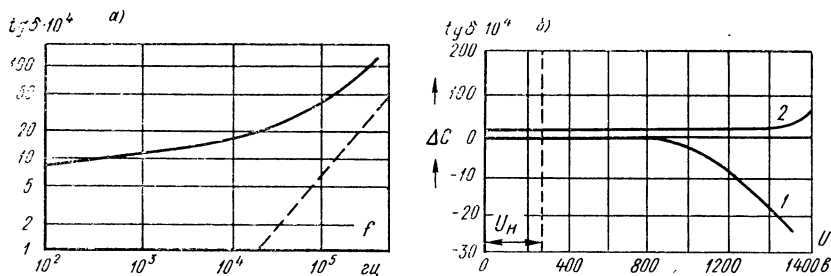


Рис. 61. Зависимость угла потерь от частоты (а) и изменение электрических свойств при повышении напряжения (б) для нового типа поликарбонатного конденсатора

боях, сопровождающихся самовосстановлением, начинается лишь после 800—900 в, а заметное возрастание угла потерь — после 1400 в; закорачивание обкладок данного конденсатора, т. е. его пробой уже без восстановления, произошло лишь при напряжении 2400 в.

Испытание конденсаторов при 85° С в течение 10 000 ч как при нулевом, так и при номинальном напряжении дало изменение емкости 1%, а при 100° С около 2%, причем после 6000 ч наблюдалась полная стабилизация емкости. В этих же условиях угол потерь, измеренный при 10 кГц, возрос от $15 \cdot 10^{-4}$ до $19 \cdot 10^{-4}$ при 85° С и до $22 \cdot 10^{-4}$ при 100° С, причем как при 85, так и при 100° С наблюдалась его стабилизация. Постоянная времени оставалась выше $2 \cdot 10^4$ сек. Многочисленные термические удары от —80 до +100° С, с возвращением к —80° С, изменяли емкость не более чем на 2% при постоянстве других электрических характеристик. Допускаемое отклонение емкости от номинала для данного типа поликарбонатных конденсаторов установлено равным $\pm 5\%$.

В разработанной серии конденсаторов при номинальном напряжении 100 в предусмотрены емкости $0,056 \div 0,33$ мкф и при 250 в — $0,01 \div 0,1$ мкф; размеры конденсаторов от $9 \times 2,3 \times 6,6$ до

$9 \times 5,8 \times 12$ мм. При напряжении 100 в удельная емкость составляет 0,4—0,5 мкф/см³, а при 250 в — до 0,2—0,25 мкф/см³; соответствующие значения удельных зарядов составляют 40—50 мкк/см³ и 50—60 мкк/см³.

Поликарбонатные конденсаторы изготавливаются не только для применения при постоянном токе или малых напряжениях переменного тока, но также и для переменного напряжения около сотен вольт. По данным фирмы «Спрейг» (1964 г.), разработанный фирмой поликарбонатный конденсатор емкостью 10 мкф на напряжение 400 в при частоте 400 гц имеет объем в 13 раз меньше, чем аналогичный бумажный конденсатор. Имеются также отдельные сообщения о применении поликарбоната для изготовления конденсаторов с пленочно-бумажным комбинированным диэлектриком.

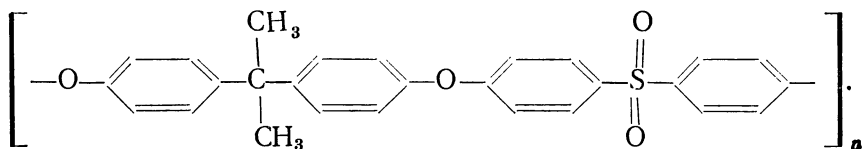
§ 19. Новые полярные пленочные диэлектрики с повышенной нагревостойкостью

Требования к верхнему пределу рабочей температуры современных конденсаторов, в том числе и намотанного типа, все время возрастают, в связи с чем проводятся работы по изысканию новых типов синтетических пленок с повышенной нагревостойкостью, пригодных для использования в конденсаторостроении. Известно, что среди неполярных пленок уже имеется такой материал, как ПТФЭ, позволяющий изготавливать из него конденсаторы с рабочей температурой до 200° С. Очевидно, что желательно было бы иметь и полярную пленку с более высокой ϵ , чем у ПТФЭ, также позволяющую изготавливать из нее конденсаторы для повышенных температур, превышающих те значения, которые можно обеспечить применением полиэфиров или поликарбоната.

В работах В. В. Коршака с сотрудниками (1962 г.) было предложено использовать для получения электроизоляционных пленок полиарилаты, полученные на основе ароматических дикарбоновых кислот, которые, в принципе, должны были иметь повышенную нагревостойкость по сравнению с полиэтилентерефталатом или поликарбонатом. Были обследованы наиболее подробно два типа полиарилатов. ТД — на основе терефталевой кислоты и диана-4,4-диоксифенила-2,2-пропана и ИТД — на основе смеси полиарилата диана с терефталевой и изофталевой кислотами с содержанием свободной изофталевой кислоты. Введение изофталевой кислоты способствовало улучшению пленкообразующих свойств и повышению механической прочности. Для изученных образцов полиарилатов при частоте 1 кгц были получены значения ϵ , равные 2,5—3,5 и $\operatorname{tg} \delta$ — 40—80 · 10⁻⁴; удельное объемное сопротивление при комнатной температуре превышало 10¹⁷ ом·см. Величина ϵ и угла потерь мало изменялась с температурой в интервале от —60 до +200; при 200° С

величина $\rho_{об}$ составляла 10^{13} — 10^{14} ом·см. Было высказано предположение, что полиарилаты можно применять до температуры 150—200°С.

В 1966 г. в США был выдан патент на применение полиарилатного полиэфирного диэлектрика в конденсаторах¹. В патенте предусмотрен ряд соединений, пригодных для конденсаторостроения и приведены результаты измерения электрических свойств пленки из соединения типа:



Указано значение ϵ , равное 3,0 и $E_{пр}=232$ кВ/мм при толщине пленки 25 мкм. Опытные конденсаторы были изготовлены отливкой раствора полимера в хлороформе на алюминиевую фольгу толщиной 6 мкм и шириной 25 мм с последующей намоткой (после сушки и образования пленки полимера на фольге) двух таких лент на оправку диаметром 7,5 мм до получения емкости 0,1 мкф. Толщина диэлектрика составляла 5 мкм, но возможно получение пленки толщиной до 1 мкм (на подложке). Для опытных конденсаторов величина ТКЕ оказалась небольшой и составляла (в зависимости от температуры): при -55°C — $195 \cdot 10^{-6}$, при $+85^\circ\text{C}$ — $60 \cdot 10^{-6}$, при $+150^\circ\text{C}$ — $35 \cdot 10^{-6}$ и при $+175^\circ\text{C}$ — $100 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Предполагается, что верхний предел рабочей температуры для конденсаторов этого типа составляет $+175^\circ\text{C}$.

Указанное выше соединение представляет собой ароматический полисульфон, который получают поликонденсацией дисфенола- n , n' -дигидроксидифенилпропана с бис- n -оксифенилсульфоновом. Особенностью структуры цепей молекул этого полимера является то, что фениленовые кольца связаны тремя типами групп: изопропилиденовой, эфирной и сульфоновой.

Этот полимер под названием «полисульфон» выпускается в США фирмой «Юнион Карбид Корпорейшн»; по данным 1966 г. годовой выпуск составил 4500 т. Материал характеризуется следующими свойствами:

Плотность	1,24 г/см ³
Временное сопротивление разрыву	710 кг/см ²
Удлинение при разрыве	50—100%
Модуль упругости при растяжении	25 300 кг/см ²
Коэффициент линейного расширения	$55 \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹
Водопоглощаемость за 24 ч	0,22%

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 3264536. 02.08.1966, Г. Б. Робинсон и Д. Дж. Валлей (фирма «Юнион Карбид Корпорейшн»).

Удельное объемное сопротивление при 20° С около 10^{17} ом·см, а при 150° С — около 10^{14} ом·см. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь от частоты показана на рис. 62. Электрические характеристики не претерпевают существенных изменений в пределах до 170° С.

Новым нагревостойким полярным полимером, получившим применение за рубежом в качестве электроизоляционного пленочного диэлектрика, является полиимид. Под этим названием объединяется группа схожих материалов, получаемых взаимодействием тетракарбоновых кислот с ароматическими диаминами в полярных растворителях (диметилацетамиде, диметилформамиде) с последующей дегидратацией образующейся полиамидокислоты. Среди полиимидов наибольшее распространение получили полимеры на основе диангида пиромеллитовой кислоты (полипиромеллитимиды), выпускаемые фирмой «Дю Пон» (США). Структурная формула наиболее известного полипиромеллитимиды имеет вид:

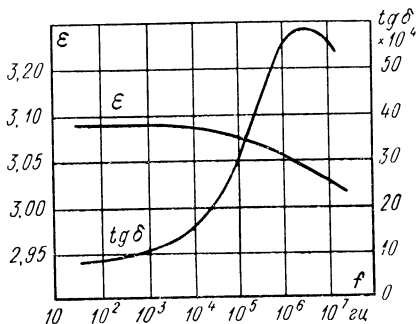
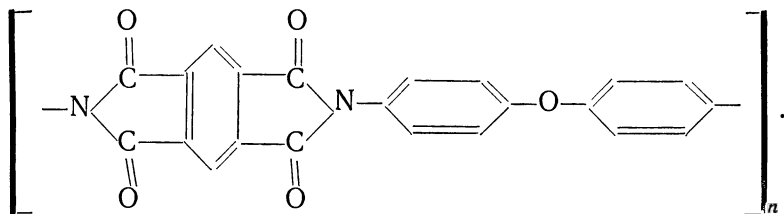


Рис. 62. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь от частоты для полисульфона



Из такого полимера изготавливается пленка, которая ранее называлась «Н-film», а потом получила также название «каптон». Полиимиды имеют следующие свойства:

Плотность	1,42 г/см ³
Временное сопротивление растяжению . .	1200—1500 кг/см ²
Относительное удлинение при разрыве . .	60—80%
Удельное объемное сопротивление при 25° С	выше 10^{17} ом·см
Диэлектрическая проницаемость в сухом состоянии	3,4
То же, в увлажненном состоянии (3,2% влаги)	4,82
Тангенс угла потерь в сухом состоянии . .	$30 \cdot 10^{-4}$
То же, в увлажненном состоянии (3,2% влаги)	$390 \cdot 10^{-4}$

Значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ указаны здесь для частоты 1 Мгц при 23°С; зависимость этих характеристик от температуры при частотах 100 гц — 100 кгц показана на рис. 63.

По данным 1966 г., полиимидная пленка изготавливалась в США с пределами толщины от 12,5 до 125 мкм. Значение $E_{\text{пр}}$ при толщине 76 мкм было указано равным 160 кВ/мм. По данным Амборского, при толщине пленки 12,5 мкм и частоте 60 гц при электродах диаметром 6,25 мм можно получать $E_{\text{пр}} = 375$ кВ/мм, при 25 мкм — 275 кВ/мм, при 50 мкм — 210 кВ/мм и при 100 мкм — 140 кВ/мм. Сообщается, что при температуре 200°С пленка сохраняет еще 60% своей кратковременной прочности, полученной при постоянном токе, и 80—85% прочности, полученной при переменном токе.

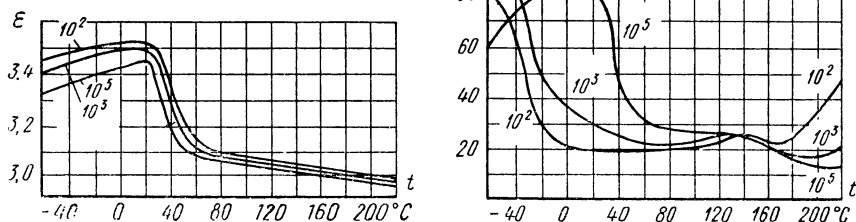


Рис. 63. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь пленки «каптан» от температуры при трех значениях частоты

Пленка отличается высокой морозостойкостью, сохраняя при температуре жидкого азота 50% величины удлинения, измеренного при комнатной температуре. При нагревании пленка не плавится и обугливается при температуре 800°С; при температуре 200°С она снижает прочность менее чем на 50% и увеличивает удлинение на 30% по сравнению с теми значениями, которые соответствуют 20°С. Длительные испытания на тепловое старение позволили заключить, что при сроке жизни около нескольких лет пленка может работать при температуре 250°С. По-видимому, в конденсаторах можно давать этой пленке верхний предел температуры до 200°С, как пленке ПТФЭ. В литературе можно найти указания, что кратковременно полиимидная пленка может работать при температуре 400—500°С. Однако тут надо иметь в виду весьма небольшие сроки работы, так как при таких температурах пленка дает большие потери в весе, особенно на воздухе. Так, за 10 ч пребывания на воздухе при 450°С потеря в весе равна 30%, а при температуре 500°С такая потеря веса достигается уже за 4 ч. При 400°С за 1000 ч пленка теряет в весе около 5%.

Уже в 1963 г. были начаты опыты по применению полиимидной пленки в конденсаторах, хотя отмечалось, что пленку

можно получать только небольшими опытными партиями. Сразу же было установлено, что пленка обладает высокой $E_{пр}$ даже при температурах выше 150°C . Для первых опытных конденсаторов было установлено, что постоянная времени превышает 10^6 сек при 75°C и составляет выше 10^3 сек при 150°C , а при 200°C еще равна 10 сек . При изменении температуры от 20 до 200°C емкость конденсатора снижалась на 2% при 80°C , на 3% при 150°C и на $3,2\%$ при 200°C . По этим данным среднее значение ТКЕ в диапазоне температур $20\text{—}200^{\circ}\text{C}$ составляет около $-180 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По данным 1965 г. отмечалось, что рабочая температура конденсаторов составляет $+200^{\circ}\text{C}$, а величина ТКЕ равна $60 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Эта величина вызывает некоторые сомнения, так как не сходится с указанной выше первоначальной цифрой и не соответствует падающему характеру зависимости ϵ от температуры, показанному на рис. 63. Поэтому вопрос о величине и знаке ТКЕ для таких конденсаторов еще нуждается в уточнении.

Вероятно, в США полиимидная пленка уже выпускается теперь в промышленном масштабе, в том числе и для применения в конденсаторостроении, но, по-видимому, она относительно дорога. К сожалению, нет сведений, позволяющих сравнить ее стоимость со стоимостью пленки из ПТФЭ, также позволяющей получать рабочую температуру до 200°C , хотя и при меньшем значении ϵ . Неизвестно также, каковы перспективы на снижение толщины этой пленки, что затрудняет правильную оценку ее перспективности. В американском обзоре 1968 г. пленка «каптон» упоминается среди других синтетических пленок, применяемых в конденсаторостроении США. Для нее указаны пределы номинальной емкости $0,01\text{—}10 \text{ мкф}$ и пределы номинального напряжения от 300 в до 25 кв ; пределы рабочей температуры от -80 до $+200^{\circ}\text{C}$. Судя по величине нижнего предела номинального напряжения, нижний предел толщины пленки едва ли ниже 10 мкм . Первые отечественные сведения об изготовлении небольших опытных тонкослойных конденсаторов из полиимидной пленки относятся к 1966 г. и изложены в статье М. М. Котона и его сотрудников.

Полиимидная смола обладает плохой технологичностью, и изготовление из нее пленки связано со значительными трудностями. При переработке полиимида обычно используется один из получаемых полупродуктов, из которого может быть получена пленка, обрабатываемая далее термически или химически для окончательного превращения в полиимид. В связи с этим в зарубежной практике наряду с полиимидом начали использовать комбинированные материалы — полиамидимид и полиэфиримид, которые значительно более технологичны, в частности, легче получаются в пленочной форме. Пленки из полиамидимид и полиэфиримид несколько уступают полиимидной пленке по нагревостойкости.

КОНДЕНСАТОРЫ С КОМБИНИРОВАННЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 20. Общие принципы применения комбинированных диэлектриков в конденсаторах намотанного типа

При изготовлении намотанных конденсаторов с фольговыми обкладками на оправку намоточного станка наматываются две ленты металлической фольги, между которыми пропущены одна или более лент диэлектрика; такое же число лент диэлектрика должно накладываться с наружной стороны на одну из лент

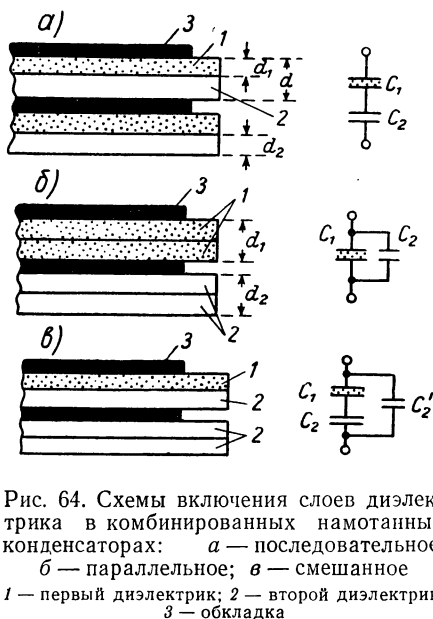


Рис. 64. Схемы включения слоев диэлектрика в комбинированных намотанных конденсаторах: а — последовательное; б — параллельное; в — смешанное

1 — первый диэлектрик; 2 — второй диэлектрик; 3 — обкладка

фольги; если этого не сделать, то при первом же витке произойдет короткое замыкание обкладок. Если намотанную конденсаторную секцию размотать так, чтобы она превратилась в длинную плоскую ленту, представляющую собой обычный плоский конденсатор, и подать напряжение на обкладки, то в электрическом поле будут находиться только «внутренние» ленты диэлектрика, а «внешние», лежащие поверх одной из обкладок с наружной стороны, не будут подвергаться действию поля; в этом случае емкость будет примерно в 2 раза меньше, чем в намотанной секции, когда обе пачки лент диэлектрика

расположены между обкладками и работают в электрическом поле, причем созданные ими емкости включены параллельно.

Таким образом, если мы хотим намотать двухслойный конденсатор, то надо использовать две ленты фольги и четыре ленты диэлектрика, взятые по две. Рассмотрим этот простой случай. Обычно все четыре ленты диэлектрика изготовлены из одного и того же материала; однако можно взять ленты и из разных материалов. При этом, если взяты два разных диэлектрика, то можно получить два основных варианта намотки: 1) в двух парах (пачках) лент взято по два разных диэлектрика в каждой (рис. 64, а); 2) в каждой паре лент взяты одинаковые диэлектрики (рис. 65, б).

В первом случае получим конденсатор с комбинированным диэлектриком из последовательно включенных компонентов, а во втором — из параллельно включенных компонентов. Как будет показано ниже, чаще используется первый вариант, т. е. последовательное включение, но в отдельных случаях оказывается целесообразным и параллельное включение; более того, иногда применяют даже смешанное включение, например, в одной пачке — две разные ленты диэлектрика, а в другой — две одинаковые (рис. 64, в).

Предположим, что мы имеем двухслойную намотку из двух разных диэлектриков 1 и 2. Рассмотрим, как будут зависеть электрические свойства конденсатора от значений электрических свойств отдельных его компонентов, образующих комбинированный диэлектрик. При этом мы пренебрегаем наличием зазоров между фольгой и диэлектриком и между слоями диэлектрика, заполненными воздухом или пропиточной массой (при пропитке комбинированного диэлектрика); поэтому приведенные ниже выражения будут носить приближенный характер.

А. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ

1. Эффективная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика. Обозначив емкость конденсатора через C , емкость, обусловленную слоем первого диэлектрика, через C_1 и второго диэлектрика через C_2 , получим

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (27)$$

Если значения диэлектрических проницаемостей, соответствующие емкостям C_1 и C_2 , будут ε_1 и ε_2 , толщина слоя первого диэлектрика d_1 , второго d_2 , а их сумма, т. е. толщина комбинированного диэлектрика d , то при площади обкладок, равной S , можем написать: $C = 0,1768 \varepsilon S/d$; $C_1 = 0,1768 \varepsilon_1 S/d_1$ и $C_2 = 0,1768 \varepsilon_2 S/d_2$. Подставляя эти значения в (27) и проводя сокращения, имеем

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{d_1 d_2}}{\frac{\varepsilon_1}{d_1} + \frac{\varepsilon_2}{d_2}}.$$

Вводя обозначение $x = d_1/d$ (тогда $1 - x = d_2/d$), получаем окончательно

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 (1 - x) + \varepsilon_2 x}. \quad (28)$$

Здесь величина x представляет собой относительное значение толщины слоя первого диэлектрика по отношению к суммарной толщине комбинированного диэлектрика.

2. Эффективное значение тангенса угла потерь комбинированного диэлектрика. Применяя последовательную схему, вводим обозначения активных сопротивлений, эквивалентных потерям: r — для конденсатора в целом, r_1 — для первого диэлектрика и r_2 — для второго. Тогда значения тангенса угла потерь будут составлять соответственно: $\operatorname{tg} \delta = \omega C r$; $\operatorname{tg} \delta_1 = \omega C_1 r_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2 = \omega C_2 r_2$, где ω — угловая частота ($\omega = 2\pi f$, где f — в гц). Сопротивление r равно сумме сопротивлений r_1 и r_2 ; поэтому

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (r_1 + r_2) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \omega C_1 r_1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \omega C_2 r_2. \quad (29)$$

Выражая значения емкостей через величины диэлектрических проницаемостей и относительные толщины слоев и используя выражения для $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$, получаем

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_1 \frac{(1-x)}{x} + \varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{x}{(1-x)}}.$$

Несколько упростив это выражение, имеем

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{(1-x)}{x}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{x}{(1-x)}}. \quad (30)$$

3. Эффективное значение удельного объемного сопротивления комбинированного диэлектрика и сопротивление изоляции конденсатора с таким диэлектриком. Предполагаем, что сопротивление изоляции конденсатора определяется только величиной объемного удельного сопротивления, т. е. пренебрегаем поверхностными утечками. Тогда для значений сопротивления изоляции конденсатора в целом и слоев диэлектрика, взятых в отдельности, можно написать: $R_{\text{из}} = \rho_{\text{об}} d / S$, $R_1 = \rho_1 d_1 / S$ и $R_2 = \rho_2 d_2 / S$. Учитывая, что сопротивления R_1 и R_2 включены последовательно, получаем

$$R_{\text{из}} = R_1 + R_2; \quad \rho_{\text{об}} d = \rho_1 d_1 + \rho_2 d_2. \quad (31)$$

Используя значение относительной толщины слоя первого диэлектрика x , имеем

$$\rho_{\text{об}} = x \rho_1 + (1-x) \rho_2. \quad (32)$$

Тогда для сопротивления изоляции конденсатора в целом можно написать

$$R_{\text{из}} = [x \rho_1 + (1-x) \rho_2] \frac{d}{S} = \frac{d_1 \rho_1 + d_2 \rho_2}{S}. \quad (33)$$

Здесь ρ_1 и ρ_2 — соответственные значения удельных сопротивлений первого и второго диэлектрика в $\text{ом} \cdot \text{см}$; если значения d_1 и d_2 выражены в см , а величина площади обкладок S — в см^2 ,

то значение $R_{из}$ получим в омах. Поскольку мы имеем дело с намотанным конденсатором, у которого утечка будет в 2 раза больше, чем у плоского (развернутой ленты), в качестве значения S надо подставлять удвоенное значение произведения длины обкладки на ее ширину.

4. Распределение напряжения между слоями комбинированного диэлектрика при переменном напряжении. Переменное напряжение распределится между слоями диэлектриков, включенных последовательно, обратно пропорционально емкостям этих слоев. Обозначив напряжение, подведенное к конденсатору, через U и его составляющие на первом и втором слое через U_1 и U_2 , имеем $U = U_1 + U_2$ и $U_1/U_2 = C_2/C_1$.

Решая эти два уравнения, находим

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Используя значения диэлектрических проницаемостей и относительной толщины слоя первого диэлектрика, получим окончательно

$$U_1 = U \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 \frac{(1-x)}{x} + \epsilon_2} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2 \frac{x}{(1-x)}}. \quad (34)$$

5. Распределение напряжения между слоями комбинированного диэлектрика при постоянном напряжении. Постоянное напряжение распределится между слоями диэлектрика, включенными последовательно, прямо пропорционально сопротивлениям изоляции этих слоев: $U_1/U_2 = R_1/R_2$.

При этом значения составляющих напряжения на первом и втором слоях будут соответственно:

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Используя значения удельных объемных сопротивлений и относительной толщины слоя первого диэлектрика, окончательно получаем

$$U_1 = U \frac{\rho_1 x}{\rho_1 x + \rho_2 (1-x)} \quad \text{и} \quad U_2 = U \frac{\rho_2 (1-x)}{\rho_1 x + \rho_2 (1-x)}. \quad (35)$$

Б. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ

1. Эффективная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика. В общем случае толщина слоя первого диэлектрика d_1 может быть не равной толщине слоя второго диэлектрика d_2 . Обозначаем отношение $d_1/d_2 = y$. В данном случае мы имеем два составляющих конденсатора: из первого диэлектрика C_1 и из второго C_2 , емкости которых включены параллельно и образуют полную емкость конденсатора C .

Для того чтобы найти эффективное значение диэлектрической проницаемости, предполагаем, что конденсатор намотан из однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ и толщиной (расстоянием между обкладками), равной сумме толщин составляющих диэлектриков: $d = (d_1 + d_2)/2$.

В этом случае можно написать: $C = C_1 + C_2 = 2C'$; $\epsilon_1/d_1 + \epsilon_2/d_2 = 2\epsilon/d$.

Отсюда эффективная диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = \frac{1}{4} \left(\epsilon_1 + \frac{d_2}{d_1} \epsilon_1 + \epsilon_2 + \frac{d_1}{d_2} \epsilon_2 \right) = \frac{1}{4} \left(\epsilon_1 + \frac{\epsilon_1}{y} + \epsilon_2 + y\epsilon_2 \right). \quad (36)$$

Если взять $d_1 = d_2$, т. е. $y = 1$, то (36) упрощается и принимает вид:

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2), \quad (37)$$

т. е. в этом случае эффективная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика представляет собой среднее арифметическое из значений ϵ_1 и ϵ_2 .

2. Эффективное значение тангенса угла потерь комбинированного диэлектрика. В данном случае удобнее использовать параллельную эквивалентную схему; вводим обозначения для активных сопротивлений, эквивалентных потерям: R для конденсатора в целом, R_1 для первого диэлектрика и R_2 для второго. Тогда значения тангенса угла потерь будут соответственно составлять: $\operatorname{tg} \delta = 1/\omega CR$, $\operatorname{tg} \delta_1 = 1/\omega C_1 R_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2 = 1/\omega C_2 R_2$.

Учитывая, что $C = C_1 + C_2$ и $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$, можем написать

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{R_1 + R_2}{\omega (C_1 + C_2) R_1 R_2} = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \frac{1}{\omega C_1 R_1} + \frac{C_2}{(C_1 + C_2)} \frac{1}{\omega C_2 R_2} = \\ &= \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1}{C_1 + C_2} + \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{C_1}{C_2}}. \end{aligned} \quad (38)$$

Вводя значения диэлектрических проницаемостей и толщин диэлектрика, а далее значение отношения толщин y , получаем окончательно

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\epsilon_2}{y\epsilon_1}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{y\epsilon_1}{\epsilon_2}}. \quad (39)$$

Если значения толщин первого и второго диэлектриков одинаковы, т. е. $y = 1$, то выражение упрощается:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}. \quad (40)$$

3. Эффективное удельное сопротивление комбинированного диэлектрика и сопротивление изоляции конденсатора с таким диэлектриком. Так же как и в предыдущем случае последовательного соединения, пренебрегаем поверхностными утечками. Сохраняя обозначения, принятые в п. Б, 1 при вычислении ϵ для схемы рис. 64, б, можем написать для значений сопротивлений изоляции конденсатора в целом и слоев диэлектрика, взятых в отдельности: $R_{\text{из}} = \rho_{\text{об}} d / 2S$; $R_1 = \rho_1 d_1 / S$; $R_2 = \rho_2 d_2 / S$.

В данном случае под величиной S подразумевается произведение длины на ширину обкладки (не удваивается), а под R_1 и R_2 — значения сопротивления изоляции слоев разных диэлектриков. Поскольку значения R_1 и R_2 включены параллельно, можем написать $R_{\text{из}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ или

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{об}} d = \frac{\rho_1 d_1 \rho_2 d_2}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}. \quad (41)$$

Подставляя значения $d = (d_1 + d_2) / 2$ и преобразовывая, получаем

$$\rho_{\text{об}} = \frac{4\rho_1\rho_2}{\frac{1}{d_1}(\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2) - \frac{1}{d_2}(d_1 + d_2)} = \frac{4\rho_1\rho_2}{\left(\rho_1 + \frac{\rho_2}{y}\right)(1 + y)}, \quad (42)$$

где y представляет собой отношение толщин d_1 и d_2 ; при $y = 1$, т. е. при одинаковых толщинах первого и второго диэлектрика, получаем

$$\rho_{\text{об}} = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}. \quad (43)$$

При этом сопротивление изоляции конденсатора с комбинированным диэлектриком определится выражением:

$$R_{\text{из}} = \frac{\rho_1\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \frac{d}{S}, \quad (44)$$

где толщина диэлектрика $d = d_1 = d_2$, и площадь обкладки S вычисляется как произведение ее длины на ширину. При использовании схемы рис. 64, б, т. е. при параллельном включении двух слоев различных диэлектриков, очевидно, что напряжение, приложенное к каждому из слоев, будет одно и то же как при переменном, так и при постоянном токе.

В практике современного конденсаторостроения известно применение комбинированных диэлектриков, составленных из полярной пленки и конденсаторной бумаги, неполярной пленки и конденсаторной бумаги и из полярной и неполярной пленок. В первом случае использование комбинированного диэлектрика, в основном, имеет целью повышение электрической прочности и надежности конденсатора; во втором случае, кроме повышения электрической прочности, имеется в виду и снижение потерь по

сравнению с чисто бумажным диэлектриком; в третьем случае стремятся получить снижение температурного коэффициента емкости конденсатора. В первых двух случаях применяется последовательное включение слоев (рис. 64, а) а в третьем случае — обычно параллельное (рис. 64, б), хотя могут быть также использованы и последовательное, и смешанное соединения (рис. 64, а и в).

Здесь мы говорили только об обкладках из фольги. В практике изготовления комбинированных конденсаторов находят себе применение и металлизированные обкладки. Обычно используется комбинация из металлизированной бумаги и неметаллизированной полярной или неполярной пленки; во втором случае иногда применяется двусторонне металлизированная бумага, чтобы исключить бумажную прокладку из работающего диэлектрика и тем самым снизить потери в конденсаторе, сохранив присущую металлизированной бумаге способность конденсатора к самовосстановлению при пробое. В этих случаях применение металлизированной бумаги связано с тем, что явление самовосстановления при пробое у нее выражено лучше, чем у некоторых типов синтетических пленок (гл. 1, § 2).

§ 21. Учет влияния зазоров на электрические свойства конденсаторов с комбинированным диэлектриком при последовательном соединении его компонентов

Выше при рассмотрении электрических свойств конденсаторов с комбинированным диэлектриком мы для упрощения пренебрегли наличием зазоров между обкладками и диэлектриком и между слоями диэлектрика, которые заполнены воздухом или пропиточной массой, после пропитки конденсатора.

Попробуем учесть наличие этих зазоров при вычислении некоторых характеристик комбинированного диэлектрика, наиболее часто применяемого на практике, с последовательным включением компонентов. Индекс «1» относим к первому слою диэлектрика (например, к синтетической пленке) индекс «2» — ко второму слою (например, к бумаге) и индекс «3» — к зазорам. Обозначим через x относительное объемное содержание первого диэлектрика, точнее, отношение толщины слоя первого диэлектрика к номинальной толщине комбинированного диэлектрика d ; для учета толщины зазоров вводим понятие о коэффициенте запрессовки k , представляющем собой отношение номинальной толщины комбинированного диэлектрика d к фактическому расстоянию между обкладками конденсатора, включающему и суммарную толщину зазоров d_3 :

$$k = \frac{d_1 + d_2}{d_1 + d_2 + d_3} = \frac{d}{d + d_3}. \quad (45)$$

где номинальная толщина $d = d_1 + d_2$.

По выражению (64) находим суммарную толщину зазоров:

$$d_3 = \frac{1-k}{k} d. \quad (46)$$

Комбинированный диэлектрик с последовательным включением слоев обоих компонентов и с наличием зазоров можно представить в виде эквивалентной схемы, включающей три емкости, соединенные последовательно (рис. 65). Значения диэлектрических проницаемостей в этих емкостях соответственно равны ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 , а толщины диэлектрика $d_1 = xd$, $d_2 = (1-x)d$ и $d_3 = (1-k)d/k$. Эффективное значение диэлектрической проницаемости комбинированного диэлектрика обозначим через ϵ , полагая, что это значение соответствует номинальной толщине диэлектрика d . Таким образом, мы считаем, что полная емкость конденсатора определяется номинальной толщиной диэлектрика, что удобнее для расчета конденсатора; при этом используемое при расчете значение ϵ будет несколько ниже фактического значения, поскольку применяемая для расчета номинальная толщина d будет ниже фактической толщины комбинированного диэлектрика с учетом зазоров.

Для определения емкости, создаваемой комбинированным диэлектриком, согласно схеме рис. 62, используем выражение:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3},$$

откуда

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1}.$$

Преобразуя это выражение, получаем

$$C = \frac{C_1}{1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_2}{C_3}} \quad (47)$$

и

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1}{x + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} (1-x) + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \left(\frac{1-k}{k} \right)}. \quad (48)$$

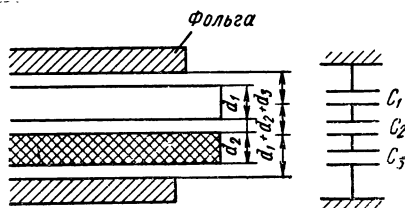


Рис. 65. Схема комбинированного конденсатора с последовательным включением слоев и с учетом наличия зазора

Пренебрегая наличием зазоров, т. е. полагая в формуле (48) $k=1$, можем привести ее к виду формулы (28), полученной без учета зазоров.

Обозначая активные сопротивления, соответствующие потерям в емкостях на схеме рис. 62, через r_1 , r_2 и r_3 , находим выражение для $\operatorname{tg} \delta$ комбинированного диэлектрика с учетом зазоров:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \omega C r = \omega \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} (r_1 + r_2 + r_3) = \\ &= \omega C_1 r_1 \frac{C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} + \omega C_2 r_2 \frac{C_1 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} + \\ &+ \omega C_3 r_3 \frac{C_1 C_2}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\frac{C_1}{C_1} + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_1}{C_3}} + \\ &+ \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{\frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2}{C_2} + \frac{C_2}{C_3}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_3}{\frac{C_3}{C_1} + \frac{C_3}{C_2} + \frac{C_3}{C_3}} = \frac{C}{C_1} \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C}{C_2} \operatorname{tg} \delta_2 + \frac{C}{C_3} \operatorname{tg} \delta_3, \end{aligned} \quad (49)$$

где $\operatorname{tg} \delta_1$, $\operatorname{tg} \delta_2$ и $\operatorname{tg} \delta_3$ — соответственно значения тангенсов угла потерь первого и второго диэлектриков и вещества, заполняющего зазоры.

Подставляя значения ε и d , получаем

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{x\varepsilon}{\varepsilon_1} \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{(1-x)\varepsilon}{\varepsilon_2} \operatorname{tg} \delta_2 + \frac{(1-k)\varepsilon}{k\varepsilon_3} \operatorname{tg} \delta_3. \quad (50)$$

В этом выражении значение ε должно быть вычислено по формуле (48). Пренебрегая наличием зазоров, т. е. полагая $k=1$ в формуле (50), можно привести ее к виду формулы (30), полученной без учета зазоров.

Влияние зазоров на величину ε и $\operatorname{tg} \delta$ комбинированного диэлектрика, полученное расчетным путем по формулам (48) и (50), показано в табл. 13 для комбинаций из полярной пленки и бумаги и неполярной пленки и бумаги. Предполагается, что зазоры заполнены неполярной пропиточной массой в обоих случаях. Расчет проведен для двух значений коэффициента запрессовки; значение $k=1$ соответствует отсутствию зазоров и расчету по формулам (28) и (30); соотношение объемов пленки и бумаги принято 1:1, т. е. $x=0,5$.

Данные табл. 13 показывают, что учет зазоров при коэффициенте запрессовки 0,95 дает снижение эффективного значения ε комбинированного диэлектрика примерно на 7—8%, а при коэффициенте запрессовки 0,90 — примерно на 15—20%; изменения угла потерь, вызванные наличием зазора, еще меньше. Таким образом, для предварительных расчетов характеристик кон-

Состав диэлектрика	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$k=1,0$	$k=0,95$	$\kappa=0,9$
Диэлектрическая проницаемость						
Полярная пленка+бумага	3	4	2	3,43	3,16	2,89
Неполярная пленка+бумага	2	4	2	2,67	2,49	2,32
$\text{tg } \delta \cdot 10^4$						
Полярная пленка+бумага	60	30	2	45	43	40
Неполярная пленка+бумага	2	30	2	11,3	10,6	10

денсаторов с комбинированным диэлектриком, когда допустима погрешность 10—20%, можно использовать приведенные выше формулы, не учитывающие наличия зазоров.

Все же интересно учесть влияние зазоров и при расчете перераспределения напряжения между отдельными компонентами комбинированного диэлектрика.

Переменное напряжение. Полагая, что через три емкости C_1 , C_2 и C_3 , включенные последовательно, проходит один и тот же ток, получаем: $I = \omega C_1 U_1 = \omega C_2 U_2 = \omega C_3 U_3$ или $C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3$. Здесь U_1 , U_2 и U_3 — соответствующие значения напряжения на каждой из трех емкостей. Полное напряжение, приложенное ко всем трем емкостям $U = U_1 + U_2 + U_3$.

Используя полученные выражения, находим:

$$U_1 = \frac{U}{1 + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_2}{C_3}}; \quad U_2 = \frac{U}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2}{C_3}}; \quad U_3 = \frac{U}{1 + \frac{C_3}{C_1} + \frac{C_3}{C_2}} \quad (51)$$

или

$$U_1 = \frac{C}{C_1} U; \quad U_2 = \frac{C}{C_2} U; \quad U_3 = \frac{C}{C_3} U.$$

Подставляя в (51) величины диэлектрических проницаемостей и толщин слоев диэлектрика, получаем:

$$U_1 = \frac{x \epsilon U}{\epsilon_1}; \quad U_2 = \frac{(1-x) \epsilon U}{\epsilon_2}; \quad U_3 = \frac{(1-k) \epsilon U}{k \epsilon_3}$$

или

$$U_1 = \frac{U}{1 + \frac{(1-x) \epsilon_1}{x \epsilon_2} + \frac{(1-k) \epsilon_1}{k \epsilon_3}}; \quad U_2 = \frac{U}{1 + \frac{x \epsilon_2}{(1-x) \epsilon_1} + \frac{(1-k) \epsilon_2}{k (1-x) \epsilon_3}}; \quad (52)$$

$$U_3 = \frac{U}{1 + \frac{k x \epsilon_3}{(1-k) \epsilon_1} + \frac{k (1-x) \epsilon_3}{(1-k) \epsilon_2}}.$$

Значения напряженности поля в отдельных компонентах комбинированного диэлектрика будут, соответственно:

$$E_1 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} E; \quad E_2 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_2} E; \quad E_3 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_3} E$$

или

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E}{x + (1-x) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \frac{(1-k)}{k} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3}}; \\ E_2 &= \frac{E}{1-x + x \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \frac{(1-k)}{k} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}}; \\ E_3 &= \frac{E}{\frac{1-k}{k} + x \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} + (1-x) \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}}. \end{aligned} \quad (53)$$

Здесь E — среднее значение напряженности поля в комбинированном диэлектрике, полученное делением напряжения, приложенного к конденсатору, на номинальную толщину диэлектрика:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{U}{d_1 + d_2}. \quad (54)$$

Результаты расчета по формулам (53) применительно к тем же расчетным данным, которые были использованы выше, при составлении табл. 13, показаны в табл. 14.

Таблица 14

Напряженность поля в компонентах	Полярная пленка + бумага			Неполярная пленка + бумага		
	$k=1$	$k=0,95$	$k=0,9$	$k=1$	$k=0,95$	$k=0,9$
E_1	1,14	1,05	0,97	1,33	1,25	1,18
E_2	0,86	0,79	0,72	0,66	0,62	0,59
E_3	—	1,58	1,44	—	1,25	1,18

Для комбинации из бумаги и неполярной пленки напряженность поля в пленке (при данных условиях) оказалась примерно в 2 раза выше, чем в бумаге; напряженность поля в зазорах, заполненных жидким неполярным диэлектриком, такая же, как в пленке, поскольку у них близкие значения ε . Для комбинации из бумаги и полярной пленки при переменном напряжении различие напряженностей поля в бумаге и в пленке меньше благодаря сближению значений ε ; резко повышены значения напряженности поля в зазорах в связи с пониженным значением ε неполярной жидкости. В данном случае учет на-

личия зазоров приводит к изменениям в абсолютных значениях напряженности поля в пленке и в бумаге, но практически не отражается на их соотношении.

Постоянное напряжение. Обозначаем значения сопротивления изоляции компонентов комбинированного диэлектрика через R_1 , R_2 и R_3 , а соответствующие значения удельных объемных сопротивлений ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 . Как и раньше, предполагаем, что утечка по поверхности пренебрежимо мала по сравнению с объемной утечкой.

Из равенства тока утечки в трех последовательно включенных емкостях следует, что $U_1/R_1 = U_2/R_2 = U_3/R_3$.

Учитывая, что $U = U_1 + U_2 + U_3$, получаем:

$$U_1 = \frac{R_1 U}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad U_2 = \frac{R_2 U}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad U_3 = \frac{R_3 U}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (55)$$

Вводя величины удельных сопротивлений и толщин слоев, после несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{U}{1 + \frac{\rho_2(1-x)}{\rho_1 x} + \frac{\rho_3(1-k)}{\rho_1 k x}}; \\ U_2 &= \frac{U}{1 + \frac{\rho_1 x}{\rho_2(1-x)} + \frac{\rho_3(1-k)}{\rho_2(1-x)k}}; \\ U_3 &= \frac{U}{1 + \frac{\rho_1 k x}{\rho_3(1-k)} + \frac{\rho_2 k(1-x)}{\rho_3(1-k)}}. \end{aligned} \quad (56)$$

Поделив значения напряжений на соответствующие значения толщин слоев, находим выражения для напряженностей поля в компонентах комбинированного диэлектрика:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E}{x + \frac{\rho_2}{\rho_1}(1-x) + \frac{\rho_3}{\rho_1} \frac{(1-k)}{k}}; \\ E_2 &= \frac{E}{1-x + \frac{\rho_1}{\rho_2} x + \frac{\rho_3}{\rho_2} \frac{(1-k)}{k}}; \\ E_3 &= \frac{E}{\frac{1-k}{k} + \frac{\rho_1 x}{\rho_3} + \frac{\rho_2}{\rho_3}(1-x)}. \end{aligned} \quad (57)$$

Примем $x=0,5$ и значения удельных сопротивлений, различающиеся друг от друга на один порядок величин, т. е. $\rho_1 = 10^{18}$ ом·см, $\rho_2 = 10^{17}$ ом·см и $\rho_3 = 10^{16}$ ом·см. Практически

величина ρ_1 может быть еще выше (для синтетических пленок), а величина ρ_3 — ниже (для жидких диэлектриков).

В этом случае, пренебрегая наличием зазоров, т. е. взяв $k=1$, получаем напряженность поля в пленке $E_1=E/0,55=1,82 E$, а напряженность поля в бумаге $E_2=E/5,5=0,182 E$. Таким образом, напряженность поля в бумаге будет в 10 раз меньше напряженности поля в пленке и в 5,5 раз меньше средней напряженности поля в комбинированном диэлектрике.

При $k=0,9$ в знаменателях формул для E_1 и E_2 появляются члены $\frac{1-k}{k} \rho_3/\rho_1$ и $\frac{1-k}{k} \rho_3/\rho_2$, которые соответственно равны $0,111 \cdot 0,01$ и $0,111 \cdot 0,1$; эти величины не вносят существенных изменений в полученные выше значения E_1 и E_2 . Величина напряженности поля в зазорах, заполненных жидким диэлектриком, $E_3=E/55,1=0,018 E$, т. е. составляет весьма малую долю средней напряженности поля в комбинированном диэлектрике. Таким образом, при постоянном напряжении наличие зазоров практически не влияет на распределение напряжения между компонентами диэлектрика.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что при постоянном напряжении, в связи с тем, что удельные сопротивления пленки и бумаги различаются значительно сильнее, чем значения их диэлектрических проницаемостей, в комбинированном диэлектрике относительная нагрузка синтетической пленки по отношению к бумаге оказывается выше, чем при переменном напряжении; кроме того, отсутствует опасность сильного повышения напряженности поля в зазорах, заполненных жидким диэлектриком. Поэтому с точки зрения повышения электрической прочности комбинированный диэлектрик из синтетической пленки и бумаги дает больший эффект при постоянном напряжении. Наиболее существенным преимуществом такого диэлектрика при переменном напряжении при использовании неполярной пленки и конденсаторной бумаги, помимо повышения электрической прочности, является снижение угла потерь в сравнении с бумагой. Однако при пропитке полярной жидкостью относительная электрическая нагрузка пленки и в этом случае будет повышенной в соответствии с различием в величинах ϵ для пленки ($\epsilon=2$) и для бумаги с полярной пропиткой ($\epsilon=6$).

§ 22. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из полярной синтетической пленки и конденсаторной бумаги

Предложение использовать комбинацию из пленки ПЭТФ и конденсаторной бумаги было, по-видимому, впервые сделано в США в 1952 г., насколько можно судить по данным более позднего патента ФРГ, бывшего в нашем распоряжении. Авторы указывали следующие преимущества комбинированного ди-

электрика¹: по сравнению с чисто бумажным — повышенная постоянная времени при высоких температурах и повышенный срок службы; по сравнению с чисто пленочным — меньший коэффициент мощности при повышенной температуре, более пологий ход температурной зависимости емкости и повышенное ионизирующее напряжение. Как минимум следует брать один слой пленки и один слой бумаги, но лучше брать два слоя бумаги, помещая между ними пленку.

Позже в США был выдан еще один патент² на конденсатор с комбинированным диэлектриком из бумаги и пленки ПЭТФ («майлар»). В этом патенте подчеркивалось, что предлагаемый комбинированный диэлектрик характеризуется расположением синтетической пленки между двух слоев бумаги; таким образом бумага прилегает к фольговым обкладкам, отделяя от них пленку. Отмечается, что при пропитке таких конденсаторов маслом или другим жидким составом устраняются воздушные включения, характерные для чисто пленочных конденсаторов и вызывающие пробой вследствие развития ионизации. В то же время электрическая прочность и надежность оказываются выше, чем у чисто бумажного конденсатора. Использование обычной бумаги и пленки «майлар», по данным автора, дает снижение объема на 20—25% в сравнении с обычными конденсаторами.

В другом американском патенте³ предлагается конструкция комбинированного бумажно-пленочного конденсатора, отличающегося повышенным сроком службы. Авторы исходят из предположения о том, что процесс разрушения диэлектрика при старении под напряжением постоянного тока начинается у анодной обкладки, а потому считают необходимым снизить напряженность поля у анода, располагая по обеим сторонам анодной пластины слои диэлектрика с меньшим удельным сопротивлением, т. е. конденсаторной бумаги, а со стороны катода — слои диэлектрика с большим удельным сопротивлением, т. е. синтетической пленки. Сопротивление пленки должно быть не менее чем в 5 раз выше сопротивления бумаги. Интересно отметить, что еще ранее аналогичный патент был выдан в Англии.⁴

В американском патенте сравнивались два варианта двухслойного комбинированного диэлектрика *а* и *б*; в случае *а* (обычном) обе обкладки конденсатора были в одинаковом положении: у каждой обкладки с одной стороны располагался слой бумаги, а с другой стороны — слой пленки; в случае *б* к обкладке *1* с обеих сторон прилегал пленка, а к обкладке *2* с обеих сторон — бумага. Согласно данным патента к об-

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, гр. 10/02, № 933402, 22.09.1955, Р. Рушетта, Р. Дальтон (фирма «Дженерал Электрик К⁰»).

² Пат. США, кл. 317—258, № 3016481, 9.01.1962, Р. Дж. Симпсон.

³ Пат. США, кл. 317—258, № 3048750, 7.08.1962, П. Г. Невервуд, Л. Л. Райс (фирма «Спрейг Электрик К⁰»).

⁴ Англ. пат., кл. 37, № 885016, 20.12.1961.

кладке 2 подводился положительный потенциал, т. е. она являлась анодом, причем количество непробившихся образцов оказалось при этом выше, чем в обычном случае (а).

Для проверки этого патента было изготовлено три партии конденсаторов емкостью по 0,5 мкф с двухслойным диэлектриком из бумаги КОН-II 10 мкм и пленки ПЭТФ («хостафан») также 10 мкм; конденсаторы были пропитаны октолом и поставлены на испытание при постоянном напряжении и температуре 125° С. Первая партия имела диэлектрик по схеме а (обычная), вторая и третья — по схеме б, но при испытании второй партии на фольгу 2 (окруженную бумагой) подавался положительный потенциал (пленка-минус), а при испытании третьей пленки — отрицательный потенциал (пленка-плюс). В каждой партии было по 10 образцов. Результаты этого испытания не подтвердили данных американского патента.

Вторая партия, в которой анодная фольга была с двух сторон окружена бумагой (соответственно катодная фольга окружена пленкой, т. е. пленка-минус), дала результаты хуже, чем первая партия (обычная). Третья партия, в которой катодная фольга была с двух сторон окружена бумагой (пленка-плюс), дала наилучшие результаты.

Преимущество конструкции, в которой не анодная, а катодная фольга окружена с обеих сторон бумагой, подтвердилось при измерении тока утечки конденсаторов комбинированного типа из бумаги и пленки ПЭТФ при повышенной температуре и высокой напряженности поля. В этом случае испытывались трехслойные конденсаторы (два слоя бумаги, один слой пленки ПЭТФ) с конструкцией комбинированного диэлектрика, показанного в левой части рис. 66; схема а предусматривала окружение бумагой обеих обкладок; при схеме б обкладка 1 была окружена с обеих сторон пленкой, а обкладка 2 — бумагой. В правой части рис. 66 показаны области разброса кривых зависимости тока утечки от времени при 100° С и напряженности 75 кВ/мм: область I соответствует схеме а, область II — схеме б при подаче положительного потенциала на обкладку А (и, соответственно, отрицательного — на обкладку В, окруженную бумагой) и область III — также схеме б, но при подаче отрицательного потенциала на обкладку А.

Рис. 66 наглядно показывает, что если положительный потенциал подать на обкладку, которая с обеих сторон соприкасается с бумагой, а отрицательный потенциал — на обкладку, с обеих сторон соприкасающуюся с пленкой, то мы получим не улучшение, предусмотренное в патенте, а ухудшение работы конденсатора; действительно, в этом случае (область III) ток утечки велик и резко увеличивается во времени; при смене полярности на обратную (область II) ток утечки мал и стабилен.

Можно предполагать, что в пропитанном комбинированном диэлектрике пропитывающая жидкость является в электриче-

ском отношении более слабой фазой, чем твердые компоненты диэлектрика (бумага и синтетическая пленка), а потому развитие пробоя начинается в жидкости, причем должны играть роль эмиссия электронов из катодной обкладки и другие прикатодные явления. В связи с этим можно полагать, что для по-

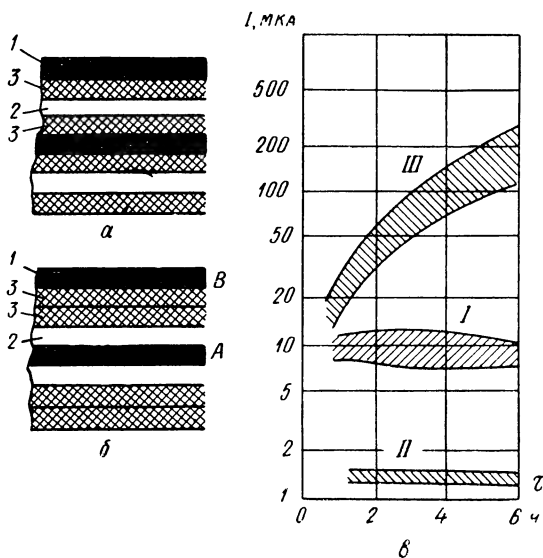


Рис. 66. Схемы конденсаторов с трехслойным комбинированным диэлектриком: *a* — обе обкладки окружены бумагой; *б* — одна обкладка окружена пленкой (*A*), а вторая — бумагой (*B*); *в* — зависимость тока утечки конденсаторов от времени

1 — фольга; 2 — пленка; 3 — бумага

вышения электрической прочности комбинированного диэлектрика необходимо снижать напряженность поля не у анода, а в первую очередь у катода, располагая с обеих его сторон слои твердого диэлектрика с повышенной проводимостью, т. е. бумагу.

Таким образом, при четном числе слоев в комбинированном диэлектрике надо располагать их так, чтобы одна из обкладок была с обеих сторон окружена бумагой и подводить к этой обкладке отрицательный потенциал (минус). Однако при этом конденсатор делается «полярным», т. е. при его включении в цепь постоянного тока надо соблюдать определенную полярность, подавая отрицательный потенциал на определенный, отмеченный знаком «минус», вывод конденсатора; при обратной полярности работа конденсатора должна резко ухудшиться. Поэтому желательно брать в комбинированном диэлектрике нечетное число слоев, а именно, число слоев бумаги на один

больше, чем число слоев пленки; в этом случае обе обкладки будут окружены с обеих сторон бумагой и конденсатор будет устойчиво работать при любой полярности напряжения.

В настоящее время комбинированный диэлектрик из полярной пленки ПЭТФ и бумаги нашел широкое применение в конденсаторостроении различных стран под различными названиями: «бифилм», «дифилм», «диэлектрик дубль» и т. д.

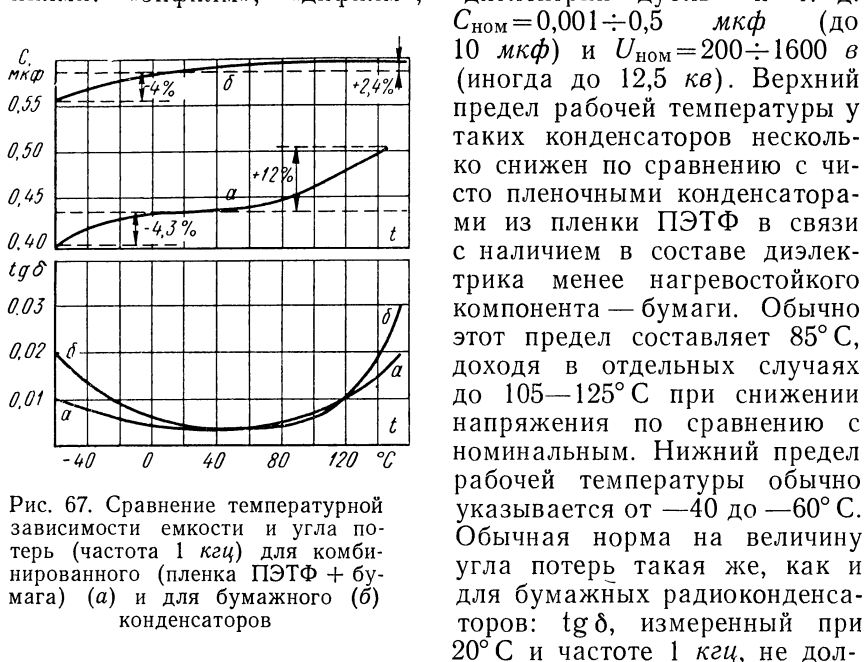


Рис. 67. Сравнение температурной зависимости емкости и угла потерь (частота 1 кГц) для комбинированного (пленка ПЭТФ + бумага) (а) и для бумажного (б) конденсаторов

должен превышать 0,01. Норма на постоянную времени выше, чем для чисто бумажных конденсаторов и обычно составляет 4000—5000 сек при 20°С. Обычный допуск по емкости составляет ± 10 —20%; иногда оговаривается возможность его снижения по специальным заказам до $\pm 5\%$.

На рис. 67 сопоставлены кривые зависимости емкости и угла потерь от температуры для конденсатора с комбинированным диэлектриком (2 слоя пленки ПЭТФ и слой бумаги) (кривые а) и для чисто бумажного конденсатора (три слоя бумаги) (кривые б). Наличие пленки в составе диэлектрика несколько сглаживает зависимость угла потерь от температуры и несколько усиливает зависимость емкости от температуры.

Поскольку значение ϵ у пленки ПЭТФ меньше, чем у бумаги, эффективное значение диэлектрической проницаемости комбинированного диэлектрика будет меньше, чем у чисто бумажного (см. табл. 17); в связи с этим при одинаковых размерах конденсатора емкость в случае комбинированного диэлектрика снижена (рис. 67) и тем больше, чем больше величина x ,

т. е. относительное содержание синтетической пленки в объеме комбинированного диэлектрика. Вместе с тем электрическая прочность, как кратковременная, так и длительная, у комбинированного диэлектрика выше, чем у чисто бумажного, причем это возрастание также тем больше, чем больше величина x .

Так, например, при испытании трехслойных конденсаторов с емкостью $0,5 \text{ мкф}$ были получены следующие значения кратковременной прочности при постоянном напряжении:

Чисто бумажный диэлектрик ($3 \times 10 \text{ мм}$)	247 кв/мм
Комбинированный ($1 \times 10 \text{ мм}$ пленка + $2 \times 10 \text{ мм}$ бумага)	293 кв/мм
Комбинированный ($2 \times 10 \text{ мм}$ пленка + $1 \times 10 \text{ мм}$ бумага)	333 кв/мм

Таким образом, в данном случае, при $x=1/3$ величина $E_{\text{пр}}$ повысилась примерно на 20%, а при $x=2/3$ — примерно на 30%.

Сравнение поведения таких же образцов конденсаторов при длительном воздействии постоянного напряжения 1200 в (40 кв/мм) и температуры 125°С дало следующие результаты: чисто бумажные конденсаторы полностью пробились менее чем за 50 ч испытания, комбинированные при $x=1/3$ показали за 1000 ч выход из строя 30% образцов, а комбинированные при $x=2/3$ за 1000 ч не дали ни одного случая пробоя.

Используя формулы (35) и принимая отношение удельных сопротивлений пленки и бумаги равным 10, находим, что при $x=2/3$ напряжение на пленке будет 1143 в и на бумаге 57 в , а при $x=1/3$, соответственно, 1000 и 200 в ; это дает значения напряженности поля: при $x=2/3$ в пленке 57 кв/мм и в бумаге 5,7 кв/мм , а при $x=1/3$ в пленке 100 кв/мм и в бумаге 10 кв/мм . Таким образом, основную электрическую нагрузку несет пленка, что обеспечивает возможность работы бумаги при высокой температуре и возможность повышения среднего значения напряженности поля комбинированного диэлектрика в сравнении с чисто бумажным, а следовательно, и снижения его толщины при заданном напряжении.

Это обстоятельство позволяет скомпенсировать влияние сниженной диэлектрической проницаемости комбинированного диэлектрика и получить выигрыш в удельных характеристиках по сравнению с обычными бумажными конденсатора по $q_{\text{уд}}$ на 30—40%. Кроме того, применение комбинированного диэлектрика позволяет повысить надежность работы намотанного конденсатора. В табл. 16 приведены рекламные данные фирмы «Эл Менко» (США) о надежности изготавливаемых этой фирмой конденсаторов с комбинированным диэлектриком типа MPD при различных напряжениях и различных температурах. В рекламе указывается, что пересчет с емкости 1 мкф к емкости 0,1 мкф показывает, что при испытании под номинальным напряжением при 125°С возможен один отказ на 14 433 600 $\text{шт} \cdot \text{ч}$. Это соответствует интенсивности отказов $\lambda \approx 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$.

Для отечественных конденсаторов типа К75-12 гарантируется надежность, т. е. вероятность безотказной работы, при номинальном напряжении и температуре 100° С в течение 1000 ч не менее 0,9995 при риске заказчика 0,1. Это соответствует интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ ч⁻¹, причем эта цифра гарантируется техническими условиями.

Таблица 15

Количество штук- часов на один отказ (емкость 1 мкф)	Испытательное напряжение в % от номинального		
	при 85° С	при 105° С	при 125° С
1 000	270	220	175
10 000	185	170	140
100 000	150	130	115
1 000 000	120	100	80
10 000 000	90	80	70

Помимо повышения электрической прочности, комбинированный диэлектрик имеет преимущество перед чисто бумажным и в отношении сниженной гигроскопичности, что подчеркивается в американском патенте.¹ В патенте оговаривается применение в составе диэлектрика компонента, способного поглощать влагу (конденсаторной бумаги), и компонента, практически не поглощающего влаги (синтетической пленки); такая комбинация повышает влагостойкость конденсатора и одновременно обеспечивает повышение его надежности при работе под напряжением. При этом рекомендуется брать ширину пленки больше ширины бумаги с таким расчетом, чтобы край пленки выступал на 1,5 мм за край бумаги. В этом случае после запекания торцы бумажных лент, через которые идет основное поступление влаги, будут закрыты краями пленки, что дополнительно улучшает влагостойкость конденсатора. Это обстоятельство особо подчеркивается во французском патенте² на конденсатор с комбинированным диэлектриком.

При негерметизированной конструкции комбинированный диэлектрик дает лучшую влагостойкость не только по сравнению с чисто бумажным, но и с чисто пленочным диэлектриком. Последнее можно объяснить тем, что небольшое количество влаги, проникающее сквозь влагозащитное покрытие внутрь конденсатора, захватывается бумагой и не поглощается пленкой, которая сохраняет высокие электрические характеристики; поскольку пленка включена последовательно с бумагой, ее удельное сопротивление определяет собой сопротивление изоляции конденсатора, которое остается при этом стабильным. Конструкции с худшей влагозащитой, поглощающие большие количества

¹ Пат. США, кл. 317—260, № 2957114, 18.10.1960, В. Лампье.

² Франц. пат., кл. H01g, № 152954, 27.02.1958, Ж. Бодри.

воды, через некоторое время начинают снижать сопротивление изоляции, так как после того, как бумага насытится влагой, последняя начинает поступать и в пленку, снижая ее удельное сопротивление. В чисто пленочном конденсаторе защитное действие бумаги отсутствует и пленка сразу же начинает поглощать влагу.

Выше мы рассматривали комбинированные конденсаторы с обкладками из фольги. Наряду с ними можно встретить также конденсаторы, изготовленные из пленки ПЭТФ и металлизированной бумаги или из конденсаторной бумаги и металлизированной пленки ПЭТФ. Конденсаторы такого типа удобны в основном при небольших напряжениях, когда приходится брать двухслойный диэлектрик с малыми значениями толщины каждого из слоев, но иногда изготавливаются и с номинальным напряжением порядка нескольких киловольт. Выше было указано наивысшее напряжение комбинированных конденсаторов, равное 12,5 кВ. В последнее время такие конденсаторы находят себе применение и при более высоких напряжениях. Так, выпускаемые в СССР конденсаторы типа К75-15 имеют пределы номинального напряжения от 3 до 50 кВ; удельный заряд этих конденсаторов доходит до 13,2 мкК/см³. При меньших напряжениях и больших емкостях можно получать еще большие значения удельного заряда: в конденсаторах типа К75-9 с комбинированным диэлектриком из бумаги и пленки «лавсан» при емкостях 25—100 мкФ и напряжении 2 кВ удельный заряд достигает 35 мкК/см³, а удельная энергия 35 Дж/л; в конденсаторах типа К75-14 (при частоте повторения импульсов 1 Гц и при использовании металлизированной бумаги) удельный заряд при емкости 100 мкФ и напряжении 3 кВ достигает величины 68 мкК/см³, а удельная энергия — 102 Дж/л.

В последнее время при изготовлении комбинированных конденсаторов из бумаги и полярной пленки, кроме пленки ПЭТФ, начинают применять также и поликарбонатную пленку. В сообщении одной из французских фирм указывалось об изготовлении конденсаторов с диэлектриком из бумаги и поликарбонатной пленки, пропитанных маслом и собранных в корпусах из стеклянных трубок, заделанных эпоксидной смолой. Конденсаторы импульсного типа рассчитаны на 10 000 разрядов. Номинальное напряжение 5—20 кВ соответствует температуре 70°С (диапазон рабочих температур от —55 до +85°С). Испытательное напряжение равно удвоенному номинальному плюс 1000 В. Постоянная времени не ниже 10 000 сек при 20°С и не ниже 1000 сек при 85°С. Величина $\operatorname{tg} \delta$ не выше $25 \cdot 10^{-4}$. При значениях емкости 1—2 мкФ эти конденсаторы имеют удельный заряд до 6—12 мкК/см³ и удельную энергию порядка 30 Дж/л.

По новым данным фирмы «Стеафикс» (Франция), номинальное напряжение импульсных конденсаторов такого типа повышено до 100—200 кВ и даже выше. В качестве преимущества

диэлектрика из бумаги и поликарбонатной пленки отмечается возможность повышения напряжения начала ионизации, в соответствии с чем возрастает и срок службы конденсаторов. Конденсаторы специально рассчитаны как накопители энергии для быстрого разряда.

В качестве одного из видов комбинированного диэлектрика можно рассматривать систему из конденсаторной бумаги и тонкой пленки полимера, нанесенной на фольгу, служащую обкладками, лаковым способом.

Е. С. Майзель провела исследование обычных бумажных конденсаторов с двумя слоями бумаги по 5 *мкм* и комбинированных бумажно-лаковых конденсаторов из фольги, лакированной эскапоновым лаком (покрытие 2,5—3 *мкм* на каждую сторону), и одного слоя бумаги 5 *мкм*. Таким образом, в первом случае толщина диэлектрика составляла $2 \times 5 = 10$ *мкм*, а во втором $2 \times (2,5 \div 3) + 5 = (10 \div 11)$ *мкм*, т. е. того же порядка. Эскапоновый лак на основе синтетического каучука, разработанный Л. Т. Пономаревым, имел следующие электрические характеристики: $\epsilon = 3,3 \div 4,1$; $\operatorname{tg} \delta = (70 \div 100) \cdot 10^{-4}$ (1 *кГц*); $\rho_{об} = 10^{14} \div 10^{15}$ *ом·см* и $E_{пр} = 200$ *кВ/мм*.

Конденсаторы прошли воздушную сушку при 130°С в течение 18 *ч*, вакуумную сушку при 125°С и давлении менее 0,3 *торр* — 18 *ч* и пропитывались октолом 6 *ч* при 120°С. Емкость конденсаторов составляла в обоих случаях около 0,11 *мкф*. Для бумажно-лаковых конденсаторов была отмечена резкая улучшенная постоянная времени: так, при 125°С бумажные конденсаторы имели постоянную времени, в среднем, 25 *сек*, а бумажно-лаковые — 9000 *сек*. Тангенс угла потерь для обоих типов конденсаторов имел близкие значения и лежал в пределах $20\text{—}35 \cdot 10^{-4}$. Изменения емкости с температурой до 100°С были одинаковыми (при 100°С увеличение емкости примерно 3%), а при 125°С бумажные конденсаторы увеличили емкость на 3,5%, тогда как для бумажно-лаковых увеличение емкости составило 4,5%. Среднее значение пробивного напряжения (постоянный ток) составило: для бумажных конденсаторов 1258 *в*, а для бумажно-лаковых 2066 *в*, т. е. на 65% выше.

При испытании на длительную работу при $E = 33$ *кВ/мм* и 125°С в течение 250 *ч* пробилось 50% бумажных конденсаторов; при этом ни один бумажно-лаковый конденсатор не пробился. Интересные результаты были получены также при измерении напряжения начала ионизации при частоте 50 *Гц*. Для бумажных конденсаторов при первом приложении напряжения было получено значение ионизирующего напряжения 600—800 *в*, а при повторном — 300 *в*; для бумажно-лаковых при первом — 800—900 *в* и при повторном — 650—800 *в*.

В связи с этим представляет интерес провести исследование бумажно-лаковых конденсаторов с более толстым диэлектриком, так же как и при переменном напряжении, в качестве си-

ловых конденсаторов. Первые результаты в этом направлении были получены Д. С. Варшавским. Можно полагать, что использование лакированной фольги в комбинации с конденсаторной бумагой представляет интерес как при малых напряжениях при использовании одного слоя бумаги, когда наличие лакового слоя будет устранять или ослаблять вредное влияние наличия в бумаге токопроводящих частиц, так и при повышенных напряжениях переменного тока, когда будет сказываться благоприятное влияние лакового слоя на повышение напряжения начала ионизации.

§ 23. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из неполярной пленки и конденсаторной бумаги

Если основным преимуществом комбинации из бумаги и полярной пленки являлись повышение электрической прочности и сопротивления изоляции по сравнению с чисто бумажным диэлектриком, то основным преимуществом комбинации из бумаги и неполярной пленки должно являться, помимо улучшения электрической прочности, заметное снижение угла потерь за счет того, что часть объема диэлектрика заполняется полимером с малыми диэлектрическими потерями. Это преимущество должно особенно сильно сказываться при повышенных частотах, когда угол потерь бумаги сильно возрастает, тогда как угол потерь неполярной пленки сохраняет свое малое значение.

На изготовление комбинированных конденсаторов этого типа, с диэлектриком из бумаги и полистирольной пленки, был выдан английский патент¹ еще в 1957 г. Авторы отмечают, что преимуществами предлагаемых комбинированных конденсаторов являются: облегчение пропитки, повышение электрической прочности и снижение ТКЕ. Для пропитки предлагается использовать специальное масло, не действующее на полистирол (например, масло марки SUNXX фирмы «Дюссек») или полисилоксановую жидкость. При двух слоях пленки по 12 мкм и разделяющем их слое бумаги 7 мкм были получены значения ТКЕ, лежащие в пределах $\pm 10 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, тогда как для чисто полистирольных конденсаторов среднее значение ТКЕ составляет $150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. При переходе от чисто пленочных конденсаторов к комбинированным данного типа пробивная напряженность при переменном токе возросла от 50—60 до 120—155 кВ/мм (в 2—3 раза), а при постоянном токе — от 90 до 140—290 кВ/мм. Постоянная времени для комбинированных конденсаторов составляла 21 000—26 000 сек, т. е. хотя снизилась в сравнении с чисто пленочными конденсаторами, но была в 2—2,5 раза выше, чем у чисто бумажных. Значения $\text{tg } \delta$ для диэлектрика из пленки 12 мкм и бумаги 7 мкм составляли $4 \cdot 10^{-4}$ при частоте 50 Гц и $5,6 \cdot 10^{-4}$ при 3 кГц, а для диэлектрика из бумаги

¹ Англ. пат., кл. 37, № 781763, 28.08.1957, Шэн Тзу Ен, Дж. Харрет

7 мкм между двумя пленками по 7 мкм — соответственно $2,5 \cdot 10^{-4}$ и $9 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, даже при частоте 300 гц комбинированные конденсаторы имеют относительно небольшие потери.

В 1960 г. в США также был выдан патент¹ на применение комбинированного диэлектрика из бумаги и неполярной пленки. Хотя в патенте оговорена возможность применения полиэтилена, но результаты испытания приводятся только для полистирольно-бумажных конденсаторов. Помимо повышенной электрической прочности комбинированного диэлектрика, отмечается также его повышенная нагревостойкость. Отношение толщины пленки к толщине бумаги должно лежать между 1:2 и 4:2. При постоянном токе соотношение толщин бумаги и пленки должно быть таково, чтобы не менее 75% (желательно до 90%) напряжения прикладывалось к пленке; при переменном токе отношение ϵ пленки к ее толщине должно быть в 2—3 раза меньше, чем для бумаги.

Можно полагать, что полистирольно-бумажные конденсаторы вполне пригодны для работы при температуре 85°С и при напряженностях поля, значительно превышающих те значения, которые приняты для чисто полистирольных конденсаторов. При частотах до 10 кгц у таких комбинированных конденсаторов можно получать относительно небольшой угол потерь, а ТКЕ даже ниже, чем у полистирольных конденсаторов. При сниженных нагрузках, их, вероятно, можно использовать и при температуре 100°С.

И. И. Калганова и В. Д. Шадрин провели исследования опытных конденсаторов с комбинированным диэлектриком из полистирольной пленки 20 мкм и конденсаторной бумаги КОН-П толщиной 10 мкм. В качестве обкладок использовались тонкие слои цинка, нанесенные испарением в вакууме или на бумагу (конденсаторы КМБ), или на пленку (конденсаторы КМП); перед металлизацией бумаги она, как обычно, покрывалась слоем этилцеллюлозного лака толщиной 1 мкм.

Увеличение емкости после пропитки составило 3,25% для КМП и 6,5% для КМБ. Электрические свойства для обоих вариантов имели близкие значения: постоянная времени при 20°С равнялась 10 000—35 000 сек; $\operatorname{tg} \delta$ при 20°С и 1 кгц составлял $25\text{—}35 \times 10^{-4}$; в интервале температур 20—120°С величина $\operatorname{TKE} = +20 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для КМБ и $+70 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для КМП. Номинальное напряжение для этих конденсаторов было установлено равным 1000 в ($E_{\text{раб}}$ около 33,3 кв/мм). При ступенчатом повышении напряжения от 1500 в через 100 в с выдержкой по 2 мин на ступени заметное снижение емкости (более 1%) можно было заметить для КМБ при 1900 в, а для КМП при 2500 в. Конденсаторы успешно выдержали испытание в течение

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 2935668, 3.05.1960, П. Робинзон, Д. Пек.

500 ч при 1000 в и 80°С; за первые 200 ч наблюдалось увеличение емкости на 1,5—2%, после чего емкость стабилизировалась. Удельный объем конденсаторов был в 2,5 раза меньше, чем у аналогичных полистирольных конденсаторов.

Повышение верхнего предела рабочей температуры при комбинировании полистирольной пленки с бумагой следует объяснять тем, что пленка, размягчаясь, прилипает к бумаге, которая служит ей при этом механической поддержкой, а также уменьшает опасность пореза пленки краями фольги.

Г. С. Кучинский применил комбинированный диэлектрик из полиэтиленовой пленки и бумаги для изготовления импульсных конденсаторов высокого напряжения с увеличенной частотой повторения импульсов, от которых требовалась повышенная добротность, т. е. сниженный угол потерь. На рис. 68 показана полученная им зависимость угла потерь от частоты для чисто полиэтиленового конденсатора (кривая 1), комбинированного полиэтиленово-бумажного ($x=0,77$, кривая 2) и чисто бумажного (кривая 3). При высокой частоте потери примерно в 10 раз ниже, чем в бумажном. На кривой 2 кружками показаны точки, полученные расчетом по упрощенной формуле (30) при значениях: $\epsilon_1=2$, $\epsilon_2=4$, $x=0,77$; значения $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$ были взяты по кривым 1 и 3; совпадение расчета с опытом вполне удовлетворительное. При разработке конденсатора на 50 кВ емкостью 0,1 мкФ с малой индуктивностью для колебательного разряда с частотой 3 МГц секции конденсатора наматывались из двух слоев полиэтиленовой пленки по 50 мкм и трех слоев бумаги по 10 мкм. Сравнение некоторых свойств этих секций с аналогичными чисто бумажными и чисто пленочными даны в табл. 16.

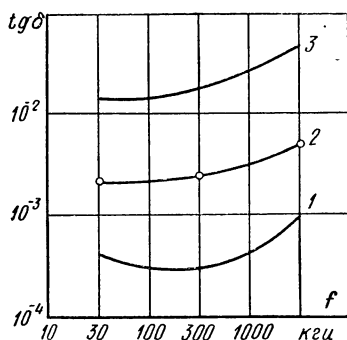


Рис. 68. Зависимость угла потерь от частоты для полиэтиленового (1), бумажно-полиэтиленового (2) и бумажного (3) конденсаторов

Таблица 16

Диэлектрик	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ (при 3 МГц)	$E_{\text{пр}}, \text{кВ/мм}$ (постоянный ток)	$E_{\text{раб}}, \text{кВ/мм}$ (импульсы)
Бумага	400—600	280	—
Полиэтилен	4—8	70—90	30—35
Полиэтилен + бумага	20—60	90	60

В этой таблице величина $E_{\text{раб}}$ выбрана с таким расчетом, чтобы конденсатор выдерживал без пробоя несколько десятков тысяч разрядов; чисто бумажный диэлектрик вообще не мог

работать в подобном режиме, а чисто пленочный требовал снижения $E_{\text{раб}}$ почти в два раза. В этих условиях, как и в описанных выше опытах с полистирольно-бумажными конденсаторами, возможность повышения $E_{\text{раб}}$, а также некоторое повышение ϵ в сравнении с чисто пленочным неполярным диэлектриком позволяли получать определенный выигрыш в удельных характеристиках.

При использовании полиэтилена, как уже отмечалось выше, надо иметь в виду, что пропитка секций маслом должна вестись при умеренной температуре и для пропитанного конденсатора верхний предел температуры должен быть сильно ограничен во избежание разрушения полиэтилена в масле.

Известны также случаи использования комбинированного диэлектрика из бумаги и пленки ПТФЭ. В случае, когда было желательно придать конденсатору свойства самовосстановления при пробое, обычно использовалась металлизированная бумага, поскольку ранее считалось, что политетрафторэтилен принципиально не поддается металлизации. Введение в диэлектрик бумаги заставляло снижать рабочую температуру конденсатора, не позволяя использовать верхний предел, свойственный такому нагревостойкому материалу, как ПТФЭ. Кроме того, естественно, заметно ухудшался угол потерь, особенно при высоких частотах. В связи с этим иногда применялась двусторонне металлизированная бумага, которая позволяла вывести из действия электрического поля сильнополярный компонент и обеспечить снижение потерь при сохранении свойства самовосстановления. Использование бумаги позволяло также облегчить пропитку таких конденсаторов. В настоящее время, когда разработана методика металлизации «фторопласта», бумажно-фторопластовый диэлектрик стал менее перспективным.

Как уже указывалось, комбинация из бумаги и неполярной пленки при высоких частотах свыше 10^3 — 10^4 гц имеет большое преимущество по сравнению с бумагой в отношении снижения угла потерь в сочетании с повышением электрической прочности (табл. 17). При низкой частоте около 50—60 гц, при которой используются обычные силовые конденсаторы, можно получить лишь относительно небольшое снижение потерь, сопровождающееся значительным снижением диэлектрической проницаемости, особенно по сравнению с бумагой, пропитанной полярной хлорированной массой, применяемой в производстве современных силовых конденсаторов.

Зависимость ϵ и $\text{tg } \delta$ комбинированного диэлектрика, составленного из конденсаторной бумаги, пропитанной трихлордифенилом, и неполярной пленки, от относительного содержания синтетической пленки в общем объеме диэлектрика x показана на рис. 69. Кривые на этом рисунке получены расчетом по формулам (28) и (30) при следующих исходных данных: $\epsilon_1=2,2$; $\epsilon_2=6$; $\text{tg } \delta_1=5 \cdot 10^{-4}$ и $\text{tg } \delta_2=20 \cdot 10^{-4}$. Данные рис. 71 позволяют

сделать вывод, что при величине $x = 0,5 \div 0,7$ можно снизить $\operatorname{tg} \delta$ такого комбинированного конденсатора в 2—3 раза по сравнению с бумажным, получив при этом снижение диэлектрической проницаемости диэлектрика на 50—55%. При таком снижении ϵ надо значительно повышать $E_{\text{раб}}$ даже для того, чтобы сохранить неизменным объем конденсатора; если же желательно еще и улучшить при этом удельные характеристики, то увеличение $E_{\text{раб}}$ должно быть еще больше.

Принимая, что удельный объем силового конденсатора в первом приближении обратно пропорционален произведению из диэлектрической проницаемости на квадрат напряженности поля, и обозначая через K отношение удельного объема бумажного конденсатора к удельному объему конденсатора с комбинированным диэлектриком, находим отношение напряженности поля в комбинированном диэлектрике к напряженности поля в чисто бумажном диэлектрике, обеспечивающее заданное отношение удельных объемов K :

$$\frac{E_K}{E_6} = \sqrt{K \frac{\epsilon_6}{\epsilon_K}}. \quad (58)$$

При $K=1$, т. е. при равенстве объемов бумажного и комбинированного конденсаторов и при указанном выше снижении ϵ , величина E_K согласно выражению (58) должна быть повышена на 40—50%. Если желательно увеличить K , т. е. получить комбинированный конденсатор с лучшими удельными характеристиками, чем бумажный, среднее значение рабочей напряженности поля надо увеличить еще сильнее.

В современных силовых конденсаторах с хлорированной пропиткой, обеспечивающей высокую устойчивость против ионизационных процессов, основным фактором, ограничивающим величину $E_{\text{раб}}$, являлись тепловые соображения, связанные с отводом тепла от потерь, выделяемого в конденсаторе; в связи с этим указанное на рис. 69 снижение $\operatorname{tg} \delta$ в принципе позволяло ставить вопрос о существенном увеличении $E_{\text{раб}}$ при переходе от бумажного к комбинированному диэлектрику рассматриваемого типа. Однако при этом надо было учитывать и экономические соображения, т. е. стоимость пленки, что до последнего времени ограничивало практические возможности внедрения комбинированного диэлектрика в силовое конденсаторостроение.

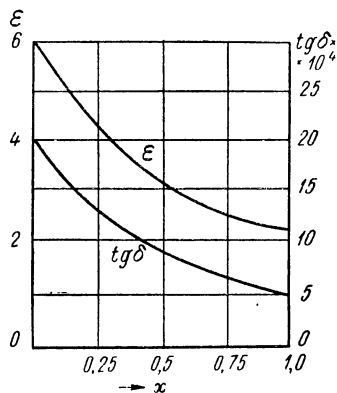


Рис. 69. Расчетная зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь комбинированного бумажно-полипропиленового диэлектрика от величины x (относительного содержания пленки в комбинированном диэлектрике)

Учитывая перспективы снижения стоимости неполярных синтетических пленок, итальянская фирма «Икар» еще в 1957 г. получила патент на изготовление конденсаторов с комбинированным диэлектриком.¹ Техничко-экономические условия для разработки силового конденсатора с комбинированным диэлектриком из бумаги и неполярной пленки появились с началом промышленного изготовления изотактической полипропиленовой пленки, нагревостойкостью которой была выше, чем у полистирольной и полиэтиленовой пленок, и достаточно высокой для применения в современном силовом конденсаторе, а стоимость значительно ниже, чем стоимость нагревостойкой пленки из политетрафторэтилена.

Первое сообщение о промышленном выпуске силовых конденсаторов нового типа с улучшенными удельными характеристиками появилось в США в 1965 г., причем указывалось, что фирма «Дженерал Электрик» начинает их поставку с января 1966 г. Конденсаторы получили название: «тип Слимвар», а использованный в них новый диэлектрик — название «магнавар». В связи со снижением потерь в конденсаторах от обычного значения 0,2% до величины меньше 0,1%, размеры и вес конденсаторов были снижены более чем на 30%, а номинальная мощность в единице повышена до 400 *квар*. При номинальном напряжении 7200; 7640 и 7960 *в* размеры таких конденсаторов составляли 204×254×1320 *мм* (объем был равен 68,5 *л*). При этом удельная мощность конденсаторов составляет 5,85 *квар/л*. Это значение, по-видимому, соответствует частоте 60 *гц*; в пересчете на 50 *гц* получаем величину 4,85 *квар/л*, тогда как для наилучших бумажных силовых конденсаторов это значение не поднималось выше 3—3,5 *квар/л*. При замене батареи конденсаторов, смонтированной на столбе, мощностью 1200 *квар*, состоящей из обычных 12 конденсаторов по 100 *квар*, тремя конденсаторами «Слимвар» по 400 *квар* (рис. 70), получалась значительная денежная экономия.

В ряде статей, опубликованных в США и носивших рекламный характер, состав нового диэлектрика «магнавар» не раскрывался, однако о нем можно было получить некоторые сведения в патенте² фирмы «Дженерал Электрик», заявленном в 1966 г. и опубликованном в 1968 г., хотя выражение «магнавар» в этом патенте не упоминается. В патенте оговаривается применение полипропиленовой пленки в чистом виде или в комбинации с бумагой для изготовления силовых конденсаторов, пропитанных трихлордифенилом. Отмечается, что коммерческий полипропилен содержит до 30% аморфной фазы, которая частично растворима в трихлордифениле. За время 6—20 дней при 90°С выдержки в трихлордифениле полипропиленовая

¹ Итальянск. пат., № 496483, 1954, Э. Джинапини Мокки.

² Пат. США, кл. 317—259, № 3363156, 09.01.1968, Е. Б. Кокс.

пленка теряет 1% на растворение и в то же время поглощает 11% трихлордифенила за счет набухания. Для пропитки чисто пленочных конденсаторов лучше применять смесь из 3 частей трихлордифенила и 1 части трихлорбензола. Для пропитки полипропилено-бумажных конденсаторов рекомендуется трихлордифенил с добавкой 0,35—1%-го эпокси-соединения, например: 1-эпоксиэтил-3,4-эпоксициклогексан.¹

Для различных комбинаций бумаги и пленки были предложены следующие названия (см. рис. 71): *а* — полный сэндвич,

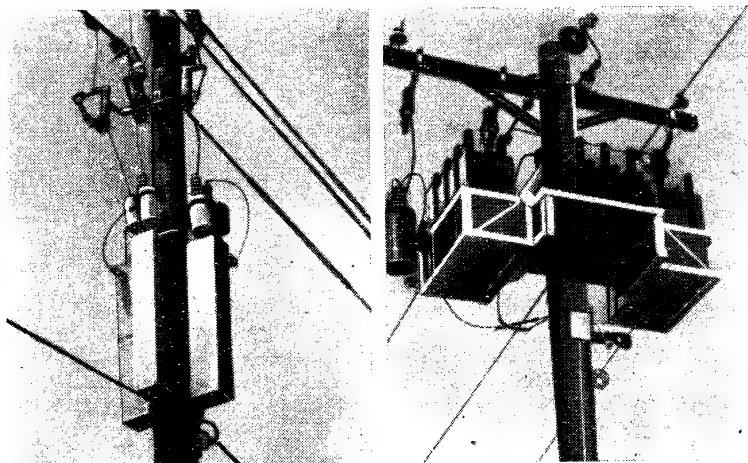


Рис. 70. Конденсаторные батареи, смонтированные на столбах распределительной линии: слева три конденсатора «Слимвар» по 400 квар; справа 12 обычных конденсаторов по 100 квар

б — обратный сэндвич *в* — полусэндвич, *г* — бумага и дифилм, *д* — дифилм. Значения $E_{\text{раб}}$ (при 60 гц) для этих комбинаций указаны в табл. 17 (кроме варианта *г*, который в этом опыте не исследовался).

Из данных табл. 17 вытекает, что при изменении x и соответственном изменении средней напряженности в комбинированном диэлектрике величины напряженностей в бумаге и пленке сохраняются примерно постоянными: 16 и 48 кв/мм соответственно. Отношение этих напряженностей, равное трем, дает нам отношение величин диэлектрических проницаемостей бумаги, пропитанной трихлордифенилом, и полипропиленовой пленки; если принять для пленки значение 2,2, то для бумаги

¹ См. также швейцарские патенты: кл. 21с, № 455891, 15.07.68 и кл. H01в, 3/24; H01g, 3/215, № 476376, 15.09.69, А. Катчман.

получаем 6,6 (при расчетах для построения графиков рис. 71 было принято 6,0).

В патенте указывается, что обычный бумажный конденсатор с номинальной мощностью 100 *квар* имеет удельный вес 0,324 *кг/квар* и потери 0,2—0,5%; в таком же корпусе конденсатор с комбинированным диэлектриком позволил получить номинальную мощность 150 *квар*; удельный вес снизился до 0,175 *кг/квар*, а потери составили 0,05—0,15%. Использовалась полипропиленовая пленка «Profax-6520F» фирмы «Геркулес Паудер К^о». Конденсатор номинальной мощностью 50 *квар* с комбинированным диэлектриком по схеме «обратный сэндвич», пропитанный «пиранолом-1499» (трихлордифенил) имел

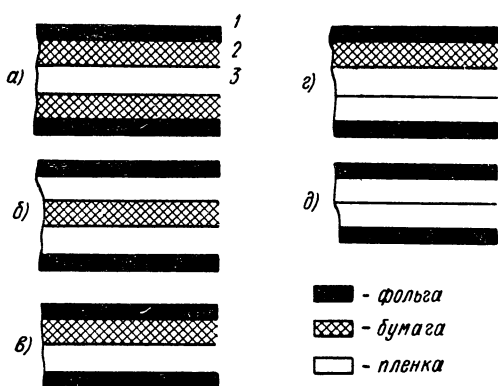


Рис. 71. Различные варианты комбинированного бумажно-полипропиленового диэлектрика: а — полный сэндвич; б — обратный сэндвич; в — полусэндвич; г — бумага и дифилм
1 — фольга; 2 — бумага; 3 — пленка

объем на 40% меньше бумажного конденсатора той же мощностью; перегрев в комбинированном конденсаторе составлял 25° С, а в бумажном 48° С; после работы в течение 5000 ч при 55—70° С потери в комбинированном конденсаторе составляли

Таблица 17

Название варианта	х, %	Толщина, мм			$U_{\text{раб.}}$ в	$E_{\text{раб.}}$ Кв/мм
		бумага	пленка	суммарная		
Чисто бумажный	0	3×7,5	—	23	370	16
»	0	3×25,4	—	76	1200	16
Сэндвич	33	2×7,5	7,5	27	740	26,8
»	33	2×15,2	15,2	45,5	1200	26,8
Полусэндвич	50	11,5	11,5	23	740	32
»	50	19	19	37,5	1200	32
Обратный сэндвич	67	7,5	2×7,5	23	860	37,2
»	67	10,9	2×10,9	32,8	1200	37,2
Дифилм	100	—	2×11,5	23	1100	48
Чисто пленочный	100	—	25,4	25,4	1200	48

Примечание. х — относительное содержание пленки в объеме диэлектрика.

0,05%, а в бумажном 0,20%. При длительном испытании группы конденсаторов по варианту «полусэндвич» (пленка 12,5 мкм и бумага 10 мкм), пропитанных трихлордифенилом с добавкой 1% 1-эпоксизтил-3,4-эпоксидциклогексана, образцы были испытаны на длительную работу при номинальном напряжении 460 в и частоте 60 гц ($E_{\text{раб}} = 460 : 22,5 = 20,5 \text{ кв/мм}$, т. е. меньше, чем в табл. 18); $\text{tg } \delta$ измерялся при температуре 25 и 85°С; за 5000 ч наблюдалось постепенное снижение $\text{tg } \delta$, указывающее на высокую стабильность нового диэлектрика.

Испытание конденсаторов мощностью 40 квар, с диэлектриком в виде обратного сэндвича (бумага 7,5 мкм между двумя пленками по 12,5 мкм), показало, что дополнительный прогрев конденсаторов, после запайки пропиточных отверстий, т. е. после их полной герметизации, при температуре порядка 100°С в течение нескольких часов, оказывается очень полезным, так как повышение давления внутри конденсатора во время такого прогрева даст необратимое повышение напряжения начала ионизации конденсаторов; в данном опыте оно повысилось от 750—1050 в до величины, превышающей 3100 в, т. е. более чем в 3 раза. Зависимость $U_{\text{и}}$ — напряжения начала ионизации конденсаторов данной фирмы от температуры характеризуется следующими цифрами:

Температура, °С	—40	—30	—20	—10	0	+10	+20
Отношение $U_{\text{и}}$ к $U_{\text{ном}}$, %	205	195	190	200	250	300	340

В 1967 г. на очередном заседании Комитета № 18 СИГРЭ был поставлен доклад Джанини Моки и проф. Дзанобетти (фирма «Икар», Италия) о разработке нового типа силового конденсатора с комбинированным диэлектриком из бумаги и изотактической полипропиленовой пленки. В докладе сообщалось, что удельная мощность новых конденсаторов повышена на 50% и составляет 3,5—4 квар/л, потери снижены примерно вдвое и составляет менее 0,1%; напряженность поля в бумаге принята равной 16 кв/мм и в пленке — 40 кв/мм (это довольно близко подходит к данным табл. 32); в корпусах бумажных конденсаторов на 66,6 и 100 квар новые конденсаторы изготовляются с мощностью 100 и 150 квар, соответственно.

В отношении стоимости указывалось, что она несколько выше, чем у обычных конденсаторов, но с учетом экономии на пониженной стоимости потерь в условиях длительной эксплуатации является вполне приемлемой.

Эти же авторы внесли некоторые уточнения по рассматриваемому вопросу в своем докладе на следующем заседании Комитета № 18 в 1968 г. Отмечалось, что напряженность поля в бумажной составляющей комбинированного диэлектрика ограничивает возможность повышения среднего значения $E_{\text{раб}}$. В настоящее время из осторожности для бумаги принято $E =$

$= 16 \text{ кВ/мм}$, что не является предельным. Напряженность поля в плеске определяется отношением диэлектрических проницаемостей, которое составляет 2,6—2,8 в зависимости от плотности бумаги и сорта хлордифенила (обычно применяется трихлордифенил) и может достигать значений около 45 кВ/мм. Сушка и пропитка конденсаторов сложнее, чем при обычных конденсаторах, так как наличие барьера из малопористой пленки затрудняет циркуляцию водяного пара внутри секции при сушке и жидкого диэлектрика при пропитке; поэтому тщательности этих процессов надо уделять особое внимание, в частности, с учетом тенденции к увеличению высоты секций до 0,5 м и выше в современных конденсаторах. Совместимость полипропиленовой пленки и полихлордифенилов оказалась очень хорошей вплоть до наивысших температур, применяемых в технологии изготовления конденсаторов, а также достигаемых в наиболее нагретых точках готовых конденсаторов в условиях их эксплуатации.

Для вычисления отношения активного объема комбинированного диэлектрика к объему чисто бумажного диэлектрика при одинаковой мощности и одинаковой напряженности поля в бумаге предложена формула:

$$k_v = \frac{1 + \frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{б}}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{б}}}{\epsilon_{\text{п}}} \frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{б}}}}, \quad (59)$$

где $d_{\text{б}}$ и $d_{\text{п}}$ — соответственно толщины бумаги и пленки, а $\epsilon_{\text{б}}$ и $\epsilon_{\text{п}}$ — значения их диэлектрических проницаемостей.

Для конденсаторов, в которых использована бумага обычной плотности, пропитанная трихлордифенилом, можно принять: $\epsilon_{\text{б}}/\epsilon_{\text{п}} = 2,8$ и $d_{\text{п}}/d_{\text{б}} = 3$ (т. е. пленка занимает 75% объема диэлектрика; $x = 0,75$). В этом случае формула (59) дает значение $k_v = 0,43$, т. е. активный объем комбинированного диэлектрика будет составлять 43% объема бумажного диэлектрика (снижение объема на 53%); с учетом влияния конструктивного оформления конденсаторов фактический выигрыш в объеме будет меньше и объем комбинированного конденсатора в целом составит 0,67 от объема аналогичного бумажного конденсатора (снижение объема на 33%).

На рис. 72, а и б показаны результаты сравнительного испытания на стабильность по МЭК (напряжение 120% номинального, мощность 144% номинальной, окружающая температура 45° С, длительность 48 ч) обычных конденсаторов — 1 и комбинированных — 2; номинальное напряжение 11,5 кВ, мощность 100 квар, частота 50 гц. Рис. 72, а показывает, что в обычном конденсаторе потери стабилизируются на уровне 0,2%, а в комбинированном — 0,06%; согласно рис. 72, б максимальный пе-

регрев по отношению к окружающей среде для обычного конденсатора составил 28°C , а для комбинированного только 13°C . Указывается, что эти испытания были проведены в порядке типовых испытаний при сдаче в эксплуатацию батареи комбинированных конденсаторов общей мощностью $2,4\text{ Мвар}$.

В 1968 г. появилось сообщение о разработке аналогичных конденсаторов фирмой «Вестингауз» (США) под названием «Дина-Вак». Потери в конденсаторах снижены в 2 раза по сравнению с бумажными, а удельная мощность повышена на 50% (в корпусе бумажного конденсатора, рассчитанного на 100 *квар*, теперь изготавливается 150 *квар*). Отмечено, что в кон-

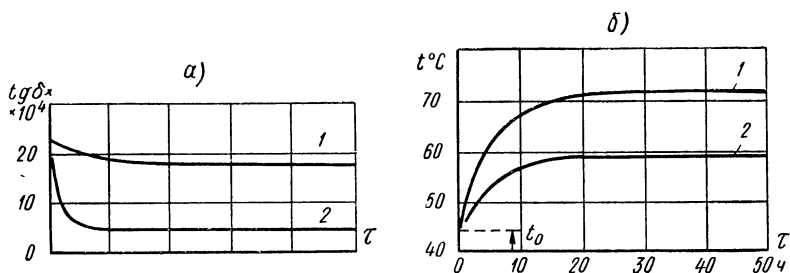


Рис. 72. Сравнение характеристик силовых конденсаторов фирмы «Икар» (Италия): а — изменение угла потерь в процессе испытания при 120% $U_{\text{ном}}$ и 45°C ; б — изменение температуры на поверхности корпуса при таком испытании

денсаторах использована новая синтетическая пленка «В-500» фирмы «Геркулес Инк.» ($\epsilon=2,3$; $\text{tg } \delta=2 \cdot 10^{-4}$; $\gamma=0,9\text{ г/см}^3$), очевидно, также полипропиленовая. Характерно, что в данном случае так же, как у фирмы «Икар» верхний предел номинальной мощности доведен только до 150 *квар* в отличие от фирмы «Дженерал Электрик», рекламировавшей аналогичные конденсаторы мощностью до 400 *квар*. В последнем каталоге фирмы «Дженерал Электрик» сообщается, что она также выпускает конденсаторы типа «Слимвар» мощностью 100 и 150 *квар*. Вероятно, эта мощность наиболее удобна для потребителя, однако не исключена возможность того, что конденсаторы мощностью 400 *квар* еще не достаточно устойчивы в тепловом отношении и менее надежны, чем конденсаторы мощностью 150 *квар*.

В 1969 г. появилось сообщение Г. Георга об изготовлении силовых бумажно-полипропиленовых конденсаторов в Швейцарии; подчеркивается их повышенная надежность в сравнении с обычными бумажными; при мощности 100 *квар* и 6,6 *кв* удельная мощность составляет 4,2 *квар/л*. Об освоении производства конденсаторов аналогичного типа, по американской лицензии, сообщили также фирма «Альстом-Савуазьени» (Франция) и фирма «ВПС» (Англия).

Таким образом, синтетические пленки, которые ранее применялись только для изготовления радиоконденсаторов, теперь в виде комбинированного диэлектрика проникли и в производство силовых конденсаторов.

§ 24. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из двух синтетических пленок

При небольших емкостях, когда требуется конденсатор с малым ТКЕ или с заданным ТКЕ положительным или отрицательным, используют керамические конденсаторы. При больших емкостях, когда приходится использовать намотанные конденсаторы, задачу получения малого ТКЕ или заданного значения ТКЕ нужной величины и нужного знака можно решать используя комбинированный диэлектрик из двух синтетических пленок: полярной и неполярной, поскольку полярным полимерам свойственно увеличивать диэлектрическую проницаемость при повышении температуры, а неполярным, наоборот, уменьшать. Различный знак ТКЕ полярной и неполярной пленки позволяет теоретически получить полную термокомпенсацию, т. е. результирующий ТКЕ конденсатора, близкий к нулю; можно получать также различные заданные значения ТКЕ, как положительные, так и отрицательные, но, очевидно, только в определенных пределах, определяемых крайними значениями ТКЕ используемых пленок.

Как было указано в § 20, при намотке конденсатора с комбинированным диэлектриком можно получать параллельное или последовательное соединение слоев. Рассмотрим связь между результирующим температурным коэффициентом емкости комбинированного конденсатора и ТКЕ пленок, из которых он намотан, для двух этих случаев соединения слоев (рис. 65, а и б).

При параллельном соединении $C = C_1 + C_2$. Дифференцируя это выражение по температуре и производя далее некоторые преобразования, получаем:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dC_1}{dt} + \frac{dC_2}{dt}; \quad \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = \frac{C_1}{C} \frac{1}{C_1} \frac{dC_1}{dt} + \frac{C_2}{C} \frac{1}{C_2} \frac{dC_2}{dt}$$

или

$$\text{ТКЕ} = \frac{C_1}{C} \text{ТК}_{\varepsilon_1} + \frac{C_2}{C} \text{ТК}_{\varepsilon_2}. \quad (60)$$

Условие полной термокомпенсации: $\text{ТКЕ} = 0$ или (поскольку $\text{ТК}_{\varepsilon_1}$ и $\text{ТК}_{\varepsilon_2}$ имеют разный знак)

$$\frac{C_1}{C} \text{ТК}_{\varepsilon_1} = - \frac{C_2}{C} \text{ТК}_{\varepsilon_2}.$$

Подставляя значения толщин и диэлектрических проницаемостей слоев пленки получаем:

$$\frac{\varepsilon_1}{d_1} \frac{d}{\varepsilon} \text{ТК } \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_2}{d_2} \frac{d}{\varepsilon} \text{ТК } \varepsilon_2 \text{ или } \frac{d_1}{d_2} = \frac{\varepsilon_1 \text{ТК } \varepsilon_1}{\varepsilon_2 \text{ТК } \varepsilon_2}. \quad (61)$$

Это выражение определяет соотношение толщин слоев полярной и неполярной пленки, при котором результирующий ТКЕ должен быть равен нулю.

При последовательном соединении имеем: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$. Дифференцируя это выражение по температуре и производя далее некоторые преобразования, получаем:

$$-\frac{1}{C^2} \frac{dC}{dt} = -\frac{1}{C_1^2} \frac{dC_1}{dt} - \frac{1}{C_2^2} \frac{dC_2}{dt}; \quad \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = \frac{C}{C_1} \frac{1}{C_1} \frac{dC_1}{dt} + \frac{C}{C_2} \frac{1}{C_2} \frac{dC_2}{dt}$$

или

$$\text{ТКЕ} = \frac{C}{C_1} \text{ТК } \varepsilon_1 + \frac{C}{C_2} \text{ТК } \varepsilon_2. \quad (62)$$

Используя условие полной термокомпенсации, аналогично предыдущему случаю, получаем:

$$\frac{C}{C_1} \text{ТК } \varepsilon_1 = \frac{C}{C_2} \text{ТК } \varepsilon_2; \quad \frac{\varepsilon}{d} \frac{d_1}{\varepsilon_1} \text{ТК } \varepsilon_1 = \frac{\varepsilon}{d} \frac{d_2}{\varepsilon_2} \text{ТК } \varepsilon_2$$

или

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\varepsilon_1 \text{ТК } \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \text{ТК } \varepsilon_1}. \quad (63)$$

Таким образом, в данном случае отношение толщин слоев определяется тем же отношением диэлектрических проницаемостей, но умноженным на обратное отношение температурных коэффициентов ε обоих слоев.

Очевидно, что полную термокомпенсацию в широком интервале температур можно было бы получить в том случае, если бы обе комбинируемые пленки имели бы линейную зависимость ε от температуры. К сожалению, это далеко не так: если у неполярных пленок эта зависимость в какой-то степени близка к линейной (рис. 24 и 36), то у большинства полярных пленок она далека от линейности (рис. 49, 51, 63). Поэтому значения ТКЕ, близкие к нулю, можно получать только в относительно узком интервале температур и зависимость емкости от температуры для комбинированного конденсатора данного типа также оказывается нелинейной. Это подтверждает рис. 73, по данным Мистича, на котором показаны результаты, полученные при комбинации пленок из полиэтилена и триацетата целлюлозы (рис. 73. а) и из полистирола и полиэтилентерефталата

(рис. 73, б); кривые для исходных пленок — сплошные, а для комбинированных конденсаторов — штриховые.

Степень термокомпенсации можно улучшить, если перейти к более сложной схеме соединения пленок, а именно, последовательно параллельной (рис. 64, в). В этом случае на величину результирующего ТКЕ можно влиять не только изменением толщины двух слоев в последовательно соединенной пачке пленок, но и толщиной слоя диэлектрика в параллельно подсоединенной пачке. На рис. 74, в показаны результаты, полученные Мистичем для комбинированного диэлектрика, в котором ис-

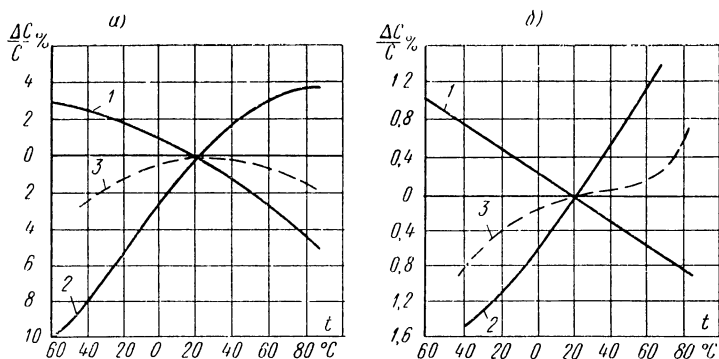


Рис. 73. Зависимость емкости термокомпенсированных пленочных конденсаторов от температуры (по Мистичу): а — комбинация полиэтилена с триацетатом; б — комбинация майлара (ПЭТФ) с полистиролом

1 — исходная неполярная пленка; 2 — исходная полярная пленка; 3 — комбинированный термокомпенсированный диэлектрик

пользовано параллельное соединение пачки, набранной из пленок полистирола, с пачкой из последовательно соединенных пленок полистирола и майлара (ПЭТФ). Сравнивая кривую на этом рисунке с кривой 3 на рис. 73, б, можно заметить резкое улучшение температурной стабильности при переходе на усложненную схему соединения пленок.

На рис. 74, б показана зависимость емкости от температуры для конденсатора одной из японских фирм, названного типом LP; состав диэлектрика не был указан, но по аналогии с рис. 74, в предположим, что и тут использована та же комбинация полистирола с полиэтилентерефталатом. На рис. 74, а (по данным другой японской фирмы) показана зависимость емкости от температуры для ряда пленочных термокомпенсированных комбинированных конденсаторов: 1 — полиэтилентерефталат с поликарбонатом, 2 — полиэтилентерефталат с полистиролом и 3 — поликарбонат с полистиролом. В данном случае слабополярная пленка — поликарбонатная — используется как

в комбинации с неполярным полистиролом, так и с полярным полиэтилентерефталатом. Можно полагать, что и в этих конденсаторах использовано сложное последовательно-параллельное соединение компонентов.

Такой тип соединения полярной и неполярной пленок в комбинированном термокомпенсированном конденсаторе оговорен в американском патенте¹ 1962 г. В качестве полярных пленок предусмотрено применение полиэтилентерефталата, полиамида, полиуретана или поликарбоната, в качестве неполярных — полистирола, полиальфаметилстирола, полиэтилена, полипропилена

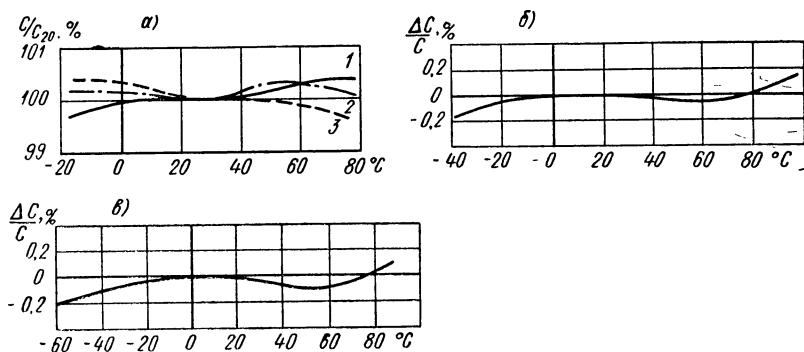


Рис. 74. Зависимость емкости от температуры для термокомпенсированных пленочных конденсаторов: а — три варианта одной японской фирмы

1 — ПЭТФ + поликарбонат; 2 — ПЭТФ + полистирол; 3 — поликарбонат + полистирол;

б — конденсатор другой японской фирмы типа LP; в — майлар + полистирол при последовательно-параллельном включении (по Мистичу)

или ПТФЭ. Возможность регулирования результирующего ТКЕ предусматривается путем изменения толщины или длины ленты (т. е. ее площади) полярного компонента, входящего в последовательное соединение с неполярным (параллельная пачка — из неполярных лент).

Отмечается также, что на величину ТКЕ можно повлиять изменением материала обкладок, заменяя алюминиевую фольгу свинцовооловянной (83% олова).

В США полистирольно-майларовые конденсаторы выпускаются с номинальной емкостью от 0,001 до 1 мкф и с допуском по емкости ± 10 и $\pm 1\%$; номинальное напряжение от 50 до 1000 в. Величина $\operatorname{tg} \delta$ составляет $10 \cdot 10^{-4}$ при 60 гц, $20 \cdot 10^{-4}$ при 1 кГц и $75 \cdot 10^{-4}$ при 1 МГц; коэффициент абсорбции 0,3—0,5%;

¹ Пат. США, кл. 317—258, № 3049651, 14.08.1962, Л. Адельсон, А. Оллмейкер.

постоянная времени выше $5 \cdot 10^4$ сек при 20°C и выше $2,5 \cdot 10^3$ сек при 85°C ; пределы рабочей температуры указаны равными от -55 до $+125^\circ \text{C}$.

Некоторые данные о характеристиках японских комбинированных пленочных термокомпенсированных конденсаторов приведены в табл. 18.

Таблица 18

Диэлектрик конденсатора	Пределы рабочей температуры, $^\circ \text{C}$	$\text{ТКЕ} \times 10^3$, град $^{-1}$	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$ (1 кГц)	Постоянная времени, сек, при 20°C
ПЭТФ + поликарбонат	$-40 \div +85$	+100	20—50	$2 \cdot 10^5$
ПЭТФ + полистирол	$-10 \div +65$	± 50	20—40	$2 \cdot 10^5$
Полистирол + поликарбонат	$-20 \div +65$	—50	5—20	$2 \cdot 10^5$
Тип LP	$-20 \div +85$	—	20	$1 \cdot 10^5$

Характер зависимости емкости от температуры для этих конденсаторов был показан на рис. 74, а и б. Номинальное напряжение для японских конденсаторов этого типа указывается равным 50 в, хотя некоторые фирмы изготавливают такие конденсаторы и на напряжения 100—140 в.

При напряжении 50 в $C_{\text{уд}} = 0,01—0,025$ мкф/см³, в зависимости от номинальной емкости, доходящей до 50 мкф при этом напряжении. Удельный заряд при $U_{\text{ном}} = 50$ в составляет 0,5—1 мкк/см³, а при более высоких напряжениях поднимается до 2—3 мкк/см³.

Помимо термокомпенсированных конденсаторов с малым ТКЕ, японские фирмы рекламируют также выпуск пленочных конденсаторов с ТКЕ, лежащим в широких пределах: ранее этот предел указывался равным от -300 до $+500 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, а теперь расширен до $-800 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Подобные конденсаторы, видимо, выпускаются не в массовом, а в серийном порядке.

В указанных выше пределах можно получить конденсаторы со следующими значениями ТКЕ: +500, +150, +100, —50, —100, —150, —250, —400, —600 и $-800 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$.

Появление на рынке поликарбонатных конденсаторов с малым ТКЕ, возможно, приведет к отказу от изготовления более сложных по конструкции и технологии термокомпенсированных конденсаторов с комбинированным диэлектриком, рассчитанных на получение ТКЕ, близкого к нулю; однако использование комбинированного диэлектрика для получения заданных значений ТКЕ в широком интервале, указанном выше, видимо, должно сохраниться.

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 25. Общие соображения

До недавнего времени для синтетических пленок нижний предел толщины составлял 5—10 $\mu\text{м}$, т. е. был выше, чем для бумаги. Поэтому повышенная электрическая прочность пленок позволяла снижать толщину диэлектрика за счет повышения $E_{\text{раб}}$ по сравнению с бумагой и тем компенсировать сниженное значение ϵ пленок (чтобы получить выигрыш в удельных характеристиках) только при относительно высоких напряжениях, когда толщина диэлектрика значительно превышает его минимально возможное значение.

При наименьшей толщине пленки 5—6 $\mu\text{м}$ и при ее использовании в один слой с металлизированными электродами, при значении $E_{\text{пр}}$, равном 200 кв/мм , можно было получать пробивное напряжение 1000—1200 в ; при запасе электрической прочности 5—6 раз это дает значение рабочего напряжения 200 в . При напряжениях 25—50 в , характерных для современной аппаратуры с полупроводниковыми приборами, такие конденсаторы будут работать с излишними запасами электрической прочности и с излишним удельным объемом и весом.

Поэтому возникла необходимость снижения толщины полимерных диэлектриков в конденсаторах хотя бы до 2—3 $\mu\text{м}$ с использованием специальной технологии, поскольку считалось, что при обычной технологии получение синтетических пленок таких толщин нереально. Поскольку можно было думать, что основное затруднение при получении сверхтонких синтетических пленок заключается в их недостаточной абсолютной механической прочности, естественным выходом из положения явилось применение подложки, которая могла бы механически поддерживать тонкую полимерную пленку в процессе изготовления конденсаторов. Простейшим методом получения полимерной пленки на подложке явился метод осаждения полимера из раствора, т. е. лаковый метод, который и получил основное распространение в практике конденсаторостроения.

При этом наметилось два основных пути изготовления конденсаторов с тонкослойным органическим диэлектриком: а) с удаленной подложкой и б) с сохраненной подложкой.

В первом случае подложка использовалась для поддержки тонкого лакового слоя только в процессе создания этого слоя, металлизации и разрезки широкой ленты на узкие, требуемой ширины. Далее, перед намоткой конденсаторов подложка отделялась и наматывалась только тонкая металлизированная пленка. Во втором случае подложка не отделялась и лаковая пленка наматывалась в конденсаторную секцию вместе

с подложкой. Очевидно, что во втором случае удельный объем конденсатора увеличивался за счет сохранения подложки, которая не являлась активным диэлектриком, а служила конструктивным элементом, не участвующим в создании емкости, но увеличивающим размеры конденсатора. Вместе с тем теоретически при наличии сохраненной подложки можно было бы дополнительно снизить толщину активного диэлектрика и тем самым ослабить влияние подложки на удельный объем, а может быть даже получить некоторый выигрыш в объеме по сравнению с конденсатором из лаковой пленки с удаленной подложкой.

Однако при использовании принципа лакировки для получения тонкослойного диэлектрика в конденсаторах с сохраненной подложкой приходилось брать примерно такие же толщины слоев, как и в конденсаторах с удаленной подложкой, а потому получать заведомо ухудшенные удельные характеристики.

В связи с этим в массовом производстве нашли себе применение прежде всего конденсаторы с удаленной подложкой, хотя в Западной Европе известное развитие имели и конденсаторы с сохраненной подложкой, главным образом, в виде конденсаторов из лакированной фольги, которые иначе назывались «лако-фольговыми» или «металло-лаковыми» конденсаторами. Хотя они и уступали конденсаторам с удаленной подложкой по удельным характеристикам, но имели то преимущество, что при их изготовлении можно было использовать готовую лакированную фольгу, поставляемую фирмой «Байер» (ФРГ), и тем упростить технологический процесс на конденсаторных заводах.

Конденсаторы с удаленной подложкой, как указано выше, используют толщину диэлектрика 2—3 *мкм*. Поскольку сейчас появилась возможность получать в свободном виде достаточно прочные синтетические пленки такой толщины (поликарбонат 2 *мкм* и полиэтилентерефталат 3 *мкм*), технологически сложные и дорогие лакопленочные конденсаторы с удаленной подложкой делаются малоперспективными. Вместе с тем появление новых приемов технологии (например, получение полимерных пленок в газовом разряде и др.), позволяющих получать тонкие пленки высокой сплошности и однородности при толщинах порядка 1 *мкм* и даже меньше на подложках из фольги или тонкой металлизированной синтетической пленки создает определенную перспективу для развития конденсаторов с сохраненной подложкой.

Таким образом, в настоящее время можно рассматривать следующие типы конденсаторов с тонкослойным органическим синтетическим диэлектриком:

1. Лакопленочные конденсаторы с удаленной подложкой.
2. Лакопленочные конденсаторы с сохраненной подложкой:
а) изоляционной и б) металлической («лако-фольговые» и «металло-лаковые» конденсаторы).
3. Тонкослойные конденсаторы с сохраненной подложкой,

изготовленные с использованием новых методов получения тонких слоев диэлектрика.

Этой схемы классификации мы и будем придерживаться в дальнейшем.

§ 26. Лакоплёночные конденсаторы с удаленной подложкой

Разработка конденсаторов этого типа была впервые выполнена в США¹. Были предложены конденсаторы как с удаленной, так и с сохраненной подложкой; последние мы рассмотрим позже.

Схема изготовления конденсаторов с удаленной подложкой сводится к следующему: на подложку из лакированной бумаги, с лакированной стороны, наносится слой «рабочего» лака, который должен иметь другую химическую природу, чем лак, покрывающий бумагу; оба лака готовятся с различными растворителями, причем растворитель «рабочего» лака не должен действовать на пленку лака, покрывающую бумажную подложку. В качестве рабочего лака взят ацетобутиратный лак, а для покрытия подложки — полистирольный лак.

После образования слоя рабочего лака и удаления из него растворителя поверх этого слоя наносится методом испарения в вакууме тонкий металлический слой; во время этой операции тонкая пленка «рабочего» лака поддерживается подложкой. После металлизации производится разрезка металлизированной широкой ленты на более узкие также при поддержке слоя лака подложкой (рис. 75, а). После этого производится отделение тонкой металлизированной пленки лака от подложки, как показано схематически на рис. 75, б, и эта пленка наматывается в виде рулончика. При таком методе удавалось получать толщину пленки 2,5 мкм, т. е. значительно тоньше, чем можно было иметь в то время для обычных синтетических пленок.

Два таких рулончика тонкой металлизированной пленки надеваются на шпиндели специального намоточного станка облегченной конструкции с малым расстоянием от оправки до поддерживающего валика и производится намотка конденсаторных секций; обкладками служат тонкие слои металла на пленках; эти обкладки смещены к противоположным торцам секции, как при намотке однослойных металло-бумажных конденсаторов (рис. 75, в). Торцы секций покрывают слоем напыленного металла, к которому затем припаиваются выводные проводники. Далее конденсатор тем или иным методом защищается от действия влаги.

В качестве подложки применялась конденсаторная бумага сначала толщиной 4,5 мкм, но затем (видимо, в связи с

¹ Пат. США, № 2754230, 10.07.1956, Д. Мак Лин, Г. Уихи.

недостаточной прочностью столь тонкой бумаги) толщиной $6,25 \text{ мкм}$; толщина слоя «защитного» лака на подложке $0,5—1 \text{ мкм}$; толщина слоя металла на поверхности «рабочего» лака $0,02—0,1 \text{ мкм}$; металлизация проводилась цинком по подслою серебра; остаточное давление $1 \cdot 10^{-4} \text{ торр}$; среднее сопротивление металлического слоя $0,5 \text{ ом}$ на квадрат.

Для опытных лакопленочных конденсаторов (диэлектрик — ацетобутират) были указаны следующие значения характери-

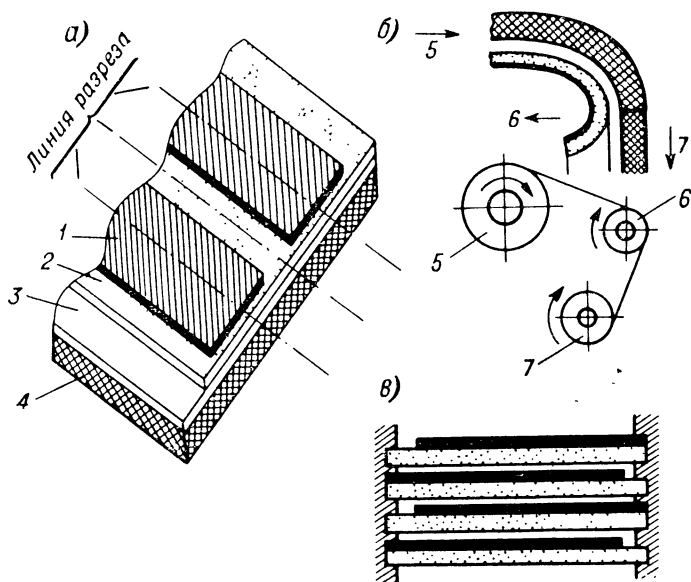


Рис. 75. Лакопленочный конденсатор с удаленной подложкой: а — схема разрезки ленты после металлизации; б — схема отделения подложки; в — схема контактирования 1 — слой металла (обкладка); 2 — слой лака (рабочий диэлектрик); 3 — слой защитного лака на подложке; 4 — бумажная подложка

стик: номинальное напряжение 50 в (постоянный ток), номинальная емкость до $1—2 \text{ мкф}$, удельный объем в $4—7$ раз меньше, чем для металло-бумажных конденсаторов; $\text{tg } \delta$ не более $400 \cdot 10^{-4}$ при частоте 10 кгц . Постоянная времени при 25° С составляла 1800 сек и после 2000 ч работы при напряжении 100 в и 100° С снизилась только до 930 сек .

В обзоре 1968 г., рассматривающем все основные типы конденсаторов, выпускаемых в США, лакопленочные конденсаторы этого типа упоминаются под названием «Метфилм-А». Пределы рабочей температуры: от -55 до $+85^\circ \text{ С}$; $C_{\text{ном}} = 0,01 \div 10 \text{ мкф}$, $U_{\text{ном}} = 50 \div 100 \text{ в}$ и $\text{tg } \delta \approx 100 \div 200 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 кгц . При емкости 10 мкф конденсаторы имеют $C_{\text{уд}} = 2,5 \text{ мкф/см}^3$ при тол-

щине диэлектрика 2 мкм. Такие конденсаторы изготавливает фирма «Спрейг».

Производство конденсаторов аналогичного типа было освоено в ФРГ под названием МКЛ (Metallisierte Kunststoff Lackfilm). В рекламе указывалось, что по сравнению с металлобумажными конденсаторами на напряжение 160 в конденсаторы МКЛ имеют при напряжении 120 в объем в 4 раза меньше, при 60 в — в 7 раз меньше и при 30 в — в 11 раз меньше. В качестве диэлектрика в этих конденсаторах использован не ацето-

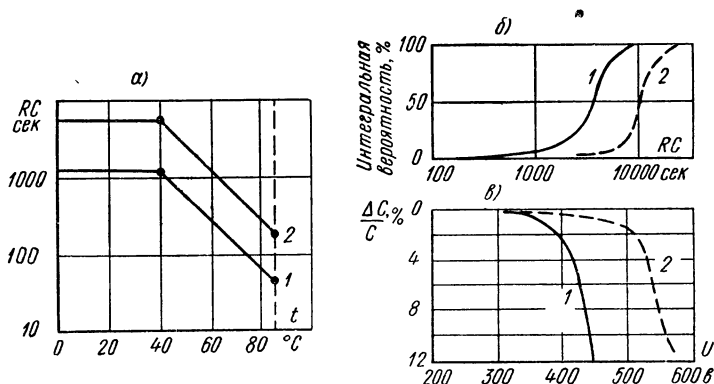


Рис. 76. Характеристики лакопленочных конденсаторов фирмы «Сименс» (ФРГ): а — зависимость постоянной времени от температуры конденсаторов типа МКЛ

1 — гарантируемое минимальное значение; 2 — гарантируемое среднее значение;

б — кривые распределения постоянной времени (1 — МКЛ; 2 — МКЛ-М); в — зависимость емкости от приложенного напряжения (1 — МКЛ; 2 — МКЛ-М)

бутират, а триацетат целлюлозы (Triafol BN). По данным Виганда (1963 г.), эти конденсаторы выпускались с номинальными напряжениями 50, 100 и 160 в и номинальной емкостью от 0,1 до 10 мкф, цилиндрического типа по классам влагостойкости: F — в алюминиевой трубке (размеры от $\varnothing 5,4 \times 18,5$ мм до $\varnothing 20,7 \times 34$ мм, т. е. объем 0,23—11,5 см³) и C — в изоляционной трубке (размеры от $\varnothing 6,2 \times 21,8$ мм до $\varnothing 21 \times 35,5$ мм, т. е. объем 0,65—12,3 см³). При наибольшем значении емкости величина $C_{уд} = 0,8 \div 0,9$ мкф/см³. Пределы рабочей температуры от —40 до +85° С. Постоянная времени этих конденсаторов характеризуется данными рис. 76, а: 1 — минимальное гарантируемое значение, 2 — среднее значение при поставке.

По более поздним данным Киршнера (1967 г.), разброс значений постоянной времени характеризуется кривой 1 на рис. 76, б; среднее значение составляет около 4000 сек, а минимальные значения могут быть и ниже 1000 сек. Эти данные

соответствуют конденсаторам с номинальным напряжением 60 в. На рис. 76, в кривая 1 показывает изменение емкости таких конденсаторов при возрастании напряжения; только после 300 в (т. е. $5 U_{\text{ном}}$) начинаются многочисленные пробои, сопровождающиеся самовосстановлением, что приводит к постепенному снижению емкости за счет уменьшения площади обкладок при деметаллизации вокруг места пробоя.

Лакопленочные конденсаторы выпускаются также и в ГДР под названием Lackfilmkondensatoren по стандарту TGL 10798—62. Номинальное напряжение 63 в; номинальные емкости 0,47 ($\varnothing 6 \times 22$ мм), 1 ($\varnothing 8 \times 22$ мм) и 2 мкф ($\varnothing 10 \times 24$ мм).

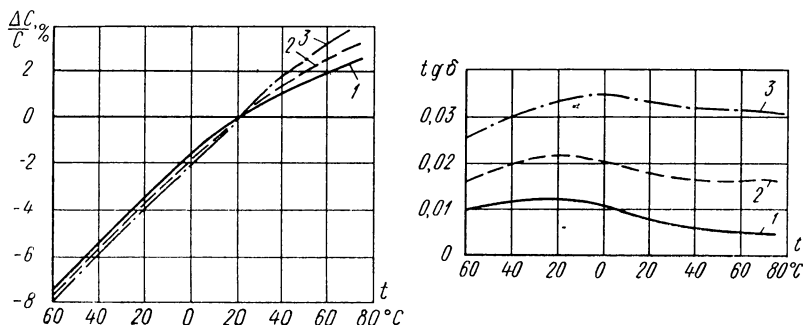


Рис. 77. Зависимость емкости и угла потерь для конденсатора типа К76-П-1 от температуры

1 — частота 50 Гц; 2 — 1 кГц; 3 — 5 кГц

Удельная емкость соответственно составляет 0,76; 0,9 и 1,06 мкф/см³; удельный заряд равен 48—67 мкк/см³. Пределы рабочей температуры от -40 до $+70^\circ\text{C}$, $\text{tg } \delta$ не выше $200 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и 800 Гц; допустимое переменное напряжение 25 в (50 Гц, эффективное значение).

В СССР конденсаторы такого типа изготавливаются под маркой К76-П-1 с диэлектриком из триацетата целлюлозы толщиной около 3 мкм и с номинальным напряжением 50 в; пределы $C_{\text{ном}}$ от 0,47 до 22 мкф. При наибольшей емкости $C_{\text{уд}} \approx 1$ мкф/см³ и удельный заряд равен 50 мкк/см³. Зависимость емкости и угла потерь конденсатора типа К76-П-1 емкость 4 мкф от температуры при трех значениях частоты (1—50 Гц, 2—1 кГц и 3—5 кГц) показаны на рис. 77, по данным Г. Р. Демиденко и Н. В. Северюхиной. В интервале температур 20 — 70°C при частоте 1 кГц $\text{TKE} = +600 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Постоянная времени конденсаторов при 20°C — не менее 1000 сек (в среднем).

За последние годы в области лакопленочных конденсаторов этого типа было выдано довольно много различных патентов, направленных на усовершенствование технологии и улучшение

свойств конденсаторов. Большое внимание было уделено улучшению отделения лакового слоя от подложки¹.

В процессе отделения лаковой пленки от подложки, когда каждая из них наматывается на свою катушку, возникает затруднение, связанное с тем, что различие в толщине пленки и подложки дает неравномерное возрастание наружных диаметров катушек и, как следствие, различие в линейных скоростях пленки и подложки. Предлагается² устройство для отделения пленки от подложки (рис. 78, а), не имеющее указанного здесь недостатка. Пленка на подложке 8 сматывается с катушки 5

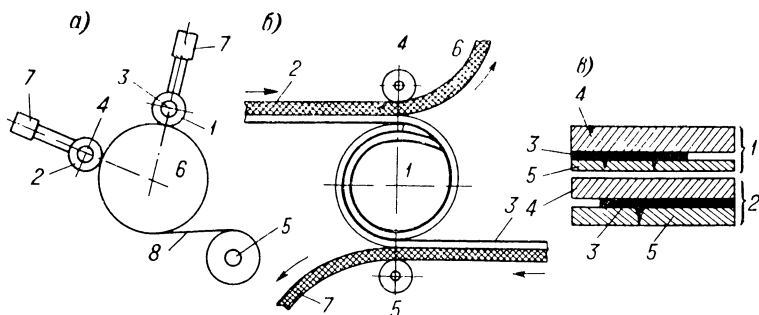


Рис. 78. Улучшение технологии и качества лакопленочных конденсаторов: а — обеспечение одинаковой линейной скорости подложки и лаковой пленки при их разделении; б — намотка секции непосредственно после отделения пленки; в — промежуточная металлизация при двухслойной конструкции

и огибает барабан 6, вращающийся с постоянной скоростью. Далее подложка поступает на катушку 3, а отделенная от нее пленка на катушку 4. За счет контакта с вращающимся барабаном идет намотка рулона с подложкой 2 и с пленкой 1, причем диаметр этих рулонов не влияет на линейную скорость намотки. Ролики 3 и 4 укреплены на подвижных штангах; прижатие рулонов 1 и 2 к барабану 6 регулируется грузами 7.

Было также предложено³ отказаться от предварительной намотки металлизированной пленки в рулоны, а прямо наматывать ее на оправку намоточного станка (рис. 78, б) непосредственно после отделения от подложки. При этом намотка на оправку 1 производится с двух движущихся в противоположных друг другу направлениях подложек с пленками 2 и 3,

¹ Пат. ГДР, кл. 21g, 20/02, (H01g), № 34846, 5.01.1965, В. Крамер, В. Кох, Э. Зибелль, Э. Шлегель; японск. пат., кл. 59A 101, 32, № 6918, 9.05.1964, Ямамото Юбидзуки; пат. ГДР, кл. 21g, 10/02, № 24896, 18.03.1963, В. Крамер, В. Кох.

² Японск. пат., кл. 59E 101, 32, № 21427, 14.10.1963, Мацунага Канехару.

³ Пат. ГДР, кл. 21g, 10/02, № 23048, 28.04.1962, В. Крамер, Х. Хендель.

сматывающихся с соответствующих бобин, снятых со станка для разрезки (после металлизации). В точках отделения лаковой пленки от подложки ставятся дополнительные подпружиненные ролики 4 и 5, прижимающие ленты к оправке. Освободившиеся ленты подложки 6 и 7 наматываются в рулоны.

Было также предложено¹ изменить материал подложки, а именно использовать пленку гидратцеллюлозы толщиной 30 мкм. После того как на гидрат целлюлозы подействовать водой или парами воды, слой лака, нанесенный на такую подложку, легко отделяется.

Для улучшения качества конденсаторов было предложено² проводить тренировку напряжением металлизированной лаковой пленки после снятия ее с подложки и перед намоткой в секцию, осуществляя эту операцию непосредственно на намоточном станке.

Благодаря наличию пор и других дефектов в тонком лаковом слое, который трудно получить совершенно однородным, в процессе металлизации могут возникать металлические мостики, пронизывающие всю пленку насквозь и затрудняющие последующее восстановление при тренировке. Для устранения этого недостатка было предложено³ использовать двухслойную систему: сначала наносить на подложку первый слой лака, на него осаждать тонкий слой вещества (углеводорода), препятствующего конденсации паров металла, поверх него наносить второй слой лака и только после этого проводить металлизацию. Наличие промежуточного слоя углеводорода защищает лежащий ниже слой лака от проникновения в него металла и тем самым не позволяет образовываться сквозным металлическим мостикам, пронизывающим всю толщину диэлектрика.

Дальнейшее развитие этой идеи привело к предложению⁴ о применении промежуточной металлизации при изготовлении лакопленочных конденсаторов. Схема этого предложения показана на рис. 78, в. Сначала на подложку наносится тонкая пленка лака 5, на нее напыляется металлический слой 3, после чего наносится вторая, более толстая пленка лака 4; после удаления подложки две лаковые ленты с промежуточной металлизацией 1 и 2 складываются попарно, как показано на рисунке, и наматываются в секцию. При этом сквозные металлические мостики могут образовываться только в одном, тонком, слое лака, а второй слой остается лишенным таких дефектов, что повышает общую электрическую прочность. Хотя это и не оговорено в патенте, но очевидно, что при осуществлении этого метода надо использовать два разных лака с различными раство-

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H01g), № 1235432, Х. Хофмейер.

² Англ. пат., кл. H1M (H01g), № 1002143, 25.08.1965, Ф. Четам (фирма «Хэнт»).

³ Пат. ГДР, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 30152, 25.09.1964, В. Крамер.

⁴ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1167984, 29.10.1964, Г. Шилл.

рителями, чтобы избежать разрушения первого слоя лака при нанесении второго слоя. Это несколько усложняет технологию, но преимущества в отношении улучшения свойств конденсаторов оказались настолько существенными, что данное предложение быстро было проведено в жизнь.

В ФРГ на основе использования этого патента был разработан конденсатор типа MKL-M (Mehrlagigen — многослойный). Улучшение электрической прочности такого двухслойного диэлектрика позволило поднять номинальные напряжения по сравнению с конденсаторами старого типа MKL почти в 2 раза, а именно: вместо 30 в — 63 в, вместо 60 в — 100 в и вместо 120 в — 200 в. Улучшение постоянной времени и устойчивости емкости при повышении напряжения было показано на рис. 76, б и в, где сплошные кривые относятся к конденсаторам MKL, а штриховые — к конденсаторам MKL-M.

Разработка многослойного лакопленочного конденсатора с промежуточной металлизацией была проведена и в СССР (конденсатор типа К-76-2). В отличие от немецкого патента, толщины слоев двух лаков взяты примерно одинаковыми. Один слой создается из триацетатного лака, а второй — из этилцеллюлозного. При суммарной толщине слоя 3 мкм, такой же как в конденсаторах К-76П-1, и той же удельной емкости, номинальное напряжение повышено до 100 в и удельный заряд при наибольшем значении емкости составляет 100 мкм/см³. Интервал рабочих температур для этих конденсаторов — 40 ÷ +85° С; постоянная времени не менее 200 сек (фактически обычно выше 2000 сек); tg δ при 20° С и частоте 50 гц не выше 120 · 10⁻⁴; изменение емкости в интервале температур от 20 до 85° С не более 5%. По-видимому, американские конденсаторы типа «Метфилм-А» также изготавливаются теперь с промежуточной металлизацией.

Следующим диэлектриком, использованным для изготовления лакопленочных конденсаторов, явился поликарбонат, электрические свойства которого, как уже отмечалось выше, значительно лучше, чем у эфиров целлюлозы. Поэтому использование его для изготовления миниатюризованных конденсаторов представляло особый интерес.

О разработках таких конденсаторов в Англии было сообщено Джонсом, который указал, что при диаметре 7 мм и длине 12 мм удалось получить емкость 0,25 мкф для пленки толщиной 3,2 мкм и 1 мкф для пленки 1,7 мкм; соответствующие значения $C_{уд}$ будут 0,5 и 2 мкф/см³; номинальное напряжение 20 в при толщине 1,7 мкм дает $E_{раб} = 12$ кв/мм и удельный заряд 40 мкк/см³; tg δ = 30 · 10⁻⁴; максимальная температура 140° С.

По данным Мак Лина, Уихи и Данте (1961 г.), опытные конденсаторы аналогичного типа изготавливались в США из американской поликарбонатной смолы «лексен», растворяемой в диэклорметане. Пленка толщиной 2,5 мкм отливалась на подложку

из «майлара», с которой снималась после металлизации алюминием. Герметизированный конденсатор из такой пленки емкостью 1 мкф имел диаметр 7,5 мм и длину 27 мм, что дает $C_{уд}=0,83 \text{ мкф/см}^3$, т. е. такого же порядка, как для лакопленочных ацетатных конденсаторов, но с постоянной времени в 10 раз более высокой. Потери также были ниже, чем в случае применения триацетата.

Разработка поликарбонатных лакопленочных конденсаторов продолжалась в США и в последующие годы. Так, в 1963 г. сообщалось, что хотя по удельным характеристикам они не дали выгоды по сравнению с триацетатными, но зато имеют расширенный диапазон рабочих температур от -78 до $+125^\circ \text{C}$, высокую постоянную времени и стабильную емкость: при частоте 1 кГц в пределах $-20 \div +40^\circ \text{C}$ емкость практически постоянна, при температурах ниже -20°C $\text{ТКЕ} = +50 \cdot 10^{-6}$, а при температурах выше $+40^\circ \text{C}$ $\text{ТКЕ} = -50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Коэффициент абсорбции оказался равным 0,005—0,009% (в тех же условиях для полистирольных конденсаторов было получено значение $k_a = 0,002—0,005\%$, а для ацетатных — около 1%).

Появление в продаже свободной поликарбонатной пленки толщиной 2 мкм сделало малоперспективными описанные выше лакопленочные конденсаторы.

Третьим диэлектриком, использованным для изготовления лакопленочных конденсаторов с удаленной подложкой, явился полистирол. Разработка полистирольных лакопленочных конденсаторов была проведена в ФРГ, где они были доведены до стадии промышленного изготовления и выпускаются под названием МКУ (буквы МК обозначают Metallisierte Kunststoff, а буква У взята из слова Styrol). Предел рабочих температур от -55 до $+70^\circ \text{C}$, $C_{ном} = 0,1 \div 1 \text{ мкф}$, $\text{ТКЕ} = -(130 \pm 50) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; постоянная времени выше 10^5 сек при температурах до 40°C , при 70°C , — порядка $4 \cdot 10^4 \text{ сек}$; при емкости 1 мкф и частоте 50 Гц $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$, при 100 кГц $\text{tg } \delta \approx 15 \cdot 10^{-4}$; допуск по емкости $\pm 1\%$; стабильность емкости во времени также 1%.

При разработке лакопленочных полистирольных конденсаторов была использована высказанная ранее идея о двухслойном лаковом диэлектрике с междуслойной металлизацией¹ с учетом того, что металлизированный полистирол обладает ухудшенной способностью к самовосстановлению (§ 2). В связи с этим в качестве первого слоя лака, по которому ведется металлизация, был взят ацетилцеллюлозный лак с толщиной слоя 1 мкм, а уже после нанесения на него слоя металла откладывался второй слой лака из полистирола толщиной 3 мкм.² Таким образом, снятая с подложки лента была трехслойной, имея два слоя лака и один, разделяющий их, тонкий слой металла. Для

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1158178, 4.06.1964, П. Хенninger.

² Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 1226210, 3.05.1967, К. Даунер.

того чтобы исключить потери в слое ацетата целлюлозы, было предложено наматывать 4 таких ленты, как показано на рис. 79, а.

Для облегчения намотки такой системы и устранения опасности разбега трехслойных лент при намотке секций конденсаторов было предложено¹ склеивать на специальном устройстве эти ленты, совместив склеивание с операцией удаления подложки.

Сообщалось, что конденсаторы типа МКУ по объему в 25 раз меньше обычных полистирольных конденсаторов. Это позво-

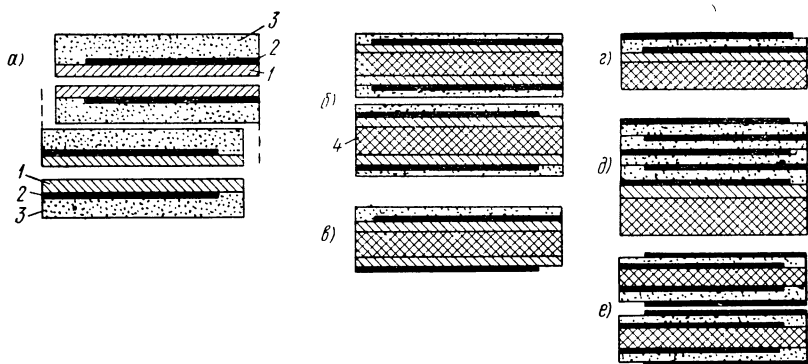


Рис. 79. Разные варианты лакопленочных конденсаторов: а — конденсатор с удаленной подложкой, двухслойный, с промежуточной металлизацией; б, в, г, д, е — конденсаторы с сохраненной подложкой
1 — ацетат; 2 — металл; 3 — полистирол; 4 — подложка

ляет думать, что толщина диэлектрика в этих конденсаторах по меньшей мере в 5 раз меньше толщины полистирольной пленки, обычно применяемой в конденсаторостроении. По-видимому, сделанное в патенте Даунера указание о толщине пленки 3 мкм является правдоподобным.

Четвертым диэлектриком, предложенным² для применения в лакопленочных конденсаторах с удаленной подложкой, явился полиимид. Предложено наносить пленку из 5—7%-ного раствора; сушка проводится при 80° С, а затем ведется термообработка 15 мин при 140° С на воздухе, далее 15 мин при 200° С в инертной среде, а затем в этой же среде еще 30 мин при 275° С. Пленка обладает следующими характеристиками: $\operatorname{tg} \delta = 20 \div 40 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне температур от 20 до 300° С; $\rho_{об}$ выше $10^{17} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при 20° С и около $10^{13} \text{ ом} \cdot \text{см}$ при 250° С; $\epsilon = 3,4$ и $E_{пр} = 200 \text{ кв/мм}$ при толщине 50 мкм.

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H01g), № 1228720, 15.06.67, И. Мейсингер.

² Авт. свидет. СССР, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 180703, 12.05.1966, А. П. Рудаков, М. И. Бессонов, М. М. Котон, Ф. С. Флоринский.

§ 27. Лакопленочные конденсаторы с сохраненной подложкой

Еще в работе Мак Лина и Уихи, кроме конденсатора с удаленной подложкой, было предложено использовать конденсаторы с сохраненной изоляционной подложкой, если лаковая пленка не обладает достаточной механической прочностью, как, например, полистирольная пленка. В этом случае ацетобутиратный лак в качестве «защитного» лака наносился на конденсаторную бумагу с двух сторон, образуя с бумагой общую подложку. Поверх слоев лака с обеих сторон подложки наносились металлические слои, а уже поверх этих слоев — пленка полистирольного лака, образующая неполярный диэлектрик конденсатора.

Для намотки секций использовались две такие сложные ленты с соответственно сдвинутыми закраинами металлизированных слоев, как показано на рис. 79, б. При этом между разноименными обкладками оказывались два слоя рабочей полистирольной пленки, а подложка в виде бумаги, лакированной ацетобутиратом, обладающая повышенными потерями, располагалась между обкладками одинаковой полярности, т. е. исключалась из действия электрического поля в конденсаторе. Таким образом, в этом конденсаторе толщина диэлектрика определялась удвоенным значением толщины рабочего лакового слоя (полистирола), что должно было увеличить объем конденсатора минимум в 4 раза; кроме того, объем дополнительно увеличивался за счет паразитного объема сохраненной подложки.

Тем не менее, по величине удельного объема такие конденсаторы были все же значительно меньше слюдяных конденсаторов, которые они были призваны заменить в качестве конденсаторов с малыми потерями и относительно стабильной емкостью. Секции этих конденсаторов обертывались защитной пленкой из ПЭТФ и помещались в герметизированные металлические корпуса, чтобы обеспечить стабильность электрических характеристик.

Кроме схемы, показанной на рис. 79, б, для конденсаторов с сохраненной подложкой были предложены и другие варианты конструкции. Согласно варианту, показанному на рис. 79, в, подложка (двусторонне лакированная бумага) металлизирована с двух сторон, причем закраины на каждой стороне смещены в противоположных направлениях; рабочий слой лака (полистирол) наносится только с одной стороны подложки; получается одноленточный конденсатор. При намотке такого конденсатора создается зазор между рабочим диэлектриком и одной из обкладок (нижней), что несколько снижает величину емкости и ее стабильность. По варианту, показанному на рис. 79, г, подложка металлизирована только с одной стороны; поверх слоя металла наносится слой рабочего лака, а поверх него —

второй металлический слой. В данном случае мы также получаем одноленточный конденсатор, но уже без наличия зазора между рабочим диэлектриком и обкладкой. Конденсатор по варианту, показанному на рис. 79, *д*, многослойный; при этом уменьшается относительная роль объема, занимаемого подложкой, в общем объеме конденсатора, а следовательно, увеличивается удельная емкость.

Во всех вариантах в отличие от схемы рис. 79, *б* подложка не экранирована и находится под действием электрического поля. Поэтому если рабочим диэлектриком служит неполярная пленка (как, например, полистирол) с малым углом потерь, то общий угол потерь конденсатора будет ухудшаться за счет повышенных потерь в подложке. Общий угол потерь можно вычислить, зная величины, характеризующие диэлектрик и подложку, по формуле (39), рассматривая лакопленочный конденсатор с сохраненной изоляционной подложкой как комбинированный конденсатор с параллельным соединением слоев.

Следует отметить, что многослойный конденсатор по схеме рис. 79, *д* нельзя изготовлять с одним и тем же типом лаковой пленки во всех слоях, так как при нанесении каждого последующего слоя используемый растворитель может разрушить предыдущий слой. Применение разных лаков усложняет технологию производства конденсаторов этого типа, так же как и необходимость осуществлять несколько проходов через лакирующее устройство, чтобы получить нужное число слоев. Поэтому конденсаторы такого типа не получили распространения, хотя попытки их изготовления, по-видимому, имели место в ряде стран.

Для полистирольных конденсаторов с сохраненной подложкой Мак Лин и Уихи приводят следующие данные: номинальная емкость $0,035 \text{ мкф}$ при напряжении 50 в (постоянный ток), удельный объем в 20 раз меньше, чем у аналогичных слюдяных конденсаторов (при указанной выше емкости объем составлял $0,5 \text{ см}^3$); пределы рабочей температуры от -55 до $+75^\circ \text{C}$.

По-видимому, полистирольные конденсаторы этого типа изготовлялись только мелкими сериями и не нашли массового применения. Вероятно, немецкий конденсатор типа МКУ следует считать более прогрессивным типом миниатюризованного полистирольного конденсатора.

В последующие годы идея создания лакопленочного конденсатора с сохраненной изоляционной подложкой продолжала интересовать изобретателей. В 1965 г. был выдан французский патент¹ на конденсатор, схема устройства которого показана на рис. 79, *е*. Подложка в виде полиэтилентерефталатной пленки толщиной 4—6 мкм металлизирована с обеих сторон, причем толщина металлических слоев берется равной нескольким сотым микрона; поверх слоев металла наносятся тонкие

¹ Франц. пат., кл. H01g, № 1394943, 1.03.1965; Ж. Галле, К. Гонель.

слои поликарбоната или политетрафторэтилена, поверх которых снова напыляются металлические слои. Две такие ленты наматываются в конденсаторную секцию, причем совмещаются одноименные обкладки каждого слоя, имеющие закраины на одном и том же краю ленты.

Второй патент¹ был выдан в ФРГ и в более общем виде. Предлагалось использовать в двухслойных лакопленочных конденсаторах с междуслойной металлизацией (§ 26) резко различные толщины лаковых слоев; более толстый слой лака, по которому ведется металлизация, может рассматриваться как изоляционная подложка для тонкого слоя, наносимого поверх слоя металла. В качестве второй обкладки предлагалось использовать металлической слой на обычной пленке лака от обычного конденсатора с удаленной подложкой, причем при намотке этот металлический слой должен был прилегать к тонкому слою лака на двухслойной ленте.

В конденсаторах с сохраненной подложкой может быть применена не только изоляционная, но и проводящая подложка в виде металлической фольги, которая в этом случае используется в качестве одной из обкладок конденсатора.

Лакопленочный конденсатор с сохраненной подложкой из алюминиевой фольги был освоен в производстве сначала в ФРГ, а потом в Англии. В ФРГ он получил обозначение ML металло-лаковый (Metall — Lack) в отличие от обозначения MP, присвоенного металло-бумажным конденсаторам (Metall — Papier). При разработке такого конденсатора важной проблемой оказалось осуществление вывода от металлизированной обкладки конденсатора, не допуская применения обычного вкладного контакта в виде металлической полоски, который, в частности, можно было использовать для присоединения вывода к фольге, являвшейся подложкой для лакового слоя.

Как в ФРГ, так и в Англии нашел себе применение следующий способ контактирования для металло-лаковых конденсаторов. С одной стороны лакированной ленты производится травление алюминия, как показано на рис. 80, а; металлизированный слой наносится со сдвигом от противоположного края ленты; при этом напыление металла на торцы намотанной секции позволяет с одного торца осуществить подвод тока к фольге, а с другого торца — к тонкому металлизированному слою (рис. 80, б).

В производстве металло-лаковых конденсаторов особое внимание надо уделять надежности контакта между фольгой и лаковой пленкой. В связи с этим перед покрытием фольги лаком (с помощью пульверизатора) она тщательно очищается и про-

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H01g), № 1239402; 2.11.1967, Ф. Генге, В. Вёлькл.

травливается с поверхности. Края фольги, лакированной с двух сторон, обрезаются до определенной ширины рулона.

Поскольку при перемотке лакированной фольги важно обеспечить ровную намотку, было предложено¹ устройство, имеющее осевое смещение втулки, на которую ведется намотка рулона, в ту или другую сторону для выравнивания намотки. Устройство представляет собой электромеханическую систему, срабатывающую в том случае если с правого или левого края фольги сходит один из двух контрольных контактов.

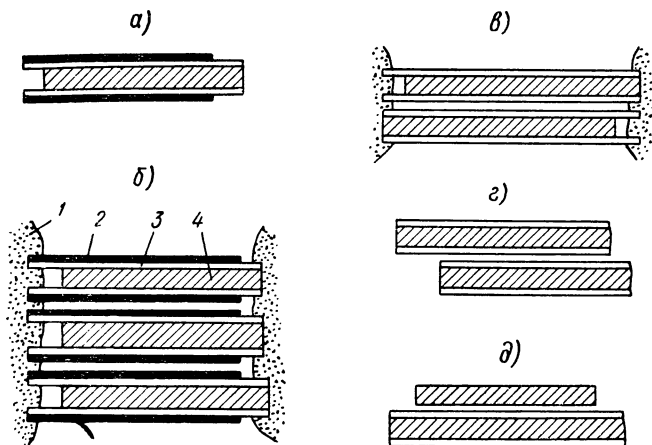


Рис. 80. Разные варианты металло-лаковых конденсаторов

1 — торцевой контакт; 2 — тонкий электрод; 3 — слой лака; 4 — фольга

Вытравливание алюминия на краевом торце лакированной фольги после ее разрезки на рулоны нужной ширины должно проводиться на глубину 1—2 мм. Травящий раствор должен растворять алюминий, не разрушая лаковой пленки; поэтому лучше брать кислые растворы, чем щелочные². При вытравливании фольги толщиной 6 мкм (содержание железа в алюминии 0,3%), покрытой с двух сторон изоцианатным лаком (по 3,5 мкм), для того чтобы стравить фольгу на 1 мм в растворе HF с концентрацией 1%, потребовалось 240 ч. Далее применялась промывка в четырех сменах дистиллированной воды (по 6 ч) и просушка. Для такого же вытравливания аналогичной фольги, но покрытой эпоксисмолой, в растворе HCl с концентрацией 7% потребовалось 70 ч. Отмечается, что травление

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 976941, 20.08.1964, Г. Хейванг.

² Англ. пат., кл. 37, 100(2), № 1811166, 2.04.1959, Шен Тзу Ен.

ведется на лакированной фольге, намотанной в рулоны, с натяжением 0,05—0,1 кг на 1 см ширины.

Значительное ускорение процесса вытравливания краев фольги и одновременно получение более ровной ширины вытравленной полосы удалось получить с переходом на метод электрохимического травления¹, при котором на фольгу подается положительный потенциал, а в качестве травящей среды используется раствор лимоннокислого натрия и алюминия с добавкой веществ, улучшающих смачиваемость фольги электролитом. Процесс травления ускорился при замене лимоннокислых электролитов растворами, содержащими ионы галоидов. Было предложено² также сочетать химическую обработку с электрохимической, что позволило улучшить равномерность глубины протравливания.

Для повышения пробивного напряжения металло-лаковых конденсаторов было предложено³ устранять сквозные дефекты в лаковой пленке путем оксидирования в этих местах алюминиевой фольги.

Большое значение для повышения качества конденсаторов этого типа имеет тщательная сушка лаковой пленки. Было предложено⁴ первую сушку лакированной фольги в широких рулонах перед металлизацией проводить под вакуумом при комнатной температуре или при умеренном нагреве, обеспечивая достаточное удаление влаги и растворителя, чтобы получить нормальную металлизацию. После разрезки металлизированного широкого рулона на более узкие рулоны в соответствии с шириной конденсаторных секций эти узкие рулоны перед намоткой секций подвергаются вторичной вакуумной сушке уже при максимально допустимой для данного лака температуре для того, чтобы удалить последние следы растворителя, которые могли бы отразиться на электрических свойствах конденсатора.

В ФРГ для лакировки фольги был использован лак под названием «десмофен десмодур». Выпуск фольги, изолированной этим лаком, был налажен для поставки конденсаторным предприятиям химической фирмой «Байер». По данным Генингена, основой лака является полиуретановая смола; толщина слоя 1,5—3 мкм; $\epsilon=3,9$ при 1 кгц (сухая пленка; при влажности 80% возрастает до 4,1); $\text{TKE}=+450 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\text{tg } \delta=70 \cdot 10^{-4}$ в сухом виде и $110 \cdot 10^{-4}$ — в увлажненном; $\rho_{\text{об}}=10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см}$ в сухом состоянии и при влажности 50%, а при влажности 80% снижается до $10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$; $E_{\text{пр}}=200 \text{ кв/мм}$ при толщине 3 мкм.

¹ Англ. пат., кл. 37, 41, № 835091, 18.05.1960, Гердинг, Гильберт и Саймонс.

² Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, (H01g), № 976979, 15.10.1964, Г. Хейванг.

³ Англ. пат., кл. H1M, (H01g), № 1052279, 21.12.1966, Шен Тзу Ен.

⁴ Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02 (H01g), № 1151603, 23.01.1964, Г. Шилл, Ф. Генге.

Выпуская в продажу новый тип конденсаторов ML, фирма «Бош» сообщила, что по интервалу температур они могут быть двух классов: I — от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$ и II — от -25 до $+70^{\circ}\text{C}$. Номинальные данные этих конденсаторов указаны в табл. 19.

Таблица 19

Номинальное напряжение, <i>в</i>		Пиковое напряжение, <i>в</i>	Емкость, <i>мкф</i>	Допуск по емкости, %
постоянный ток	50 <i>гц</i>			
120	30	160	2—12	от -10
80	20	120	15—200	до -20

Испытательное напряжение между обкладками равно пиковому; между обкладками и корпусом оно равно 1000 *в* (50 *гц*, 2 *сек*). При пульсирующем напряжении допускается следующая переменная составляющая (в процентах от номинального напряжения): 20% при 50 *гц*, 15% при 120 *гц*, 9% при 300 *гц*, 5% при 1 *кГц*, 2% при 5 *кГц* и 1% при 10 *кГц*. Постоянная времени — не ниже 200 *сек*; $\text{tg } \delta$ — не выше $150 \cdot 10^{-4}$. Объем конденсаторов типа ML был в 3 раза меньше объема металло-бумажных типа МР; при наибольших значениях $S_{\text{ном}}$ удельная емкость составляла 0,55—0,62 *мкф/см*³, что дает удельный заряд 50—70 *мкк/см*³.

Металло-лаковые конденсаторы были разработаны в Англии под названием «стантелак».

По сообщению Герлинга и Смита, на Международной конференции по радиоматериалам и деталям в Лондоне (1961 г.) для английских металло-лаковых конденсаторов указаны следующие величины удельной емкости: при толщине лакового слоя 3 *мкм* $S_{\text{уд}} = 0,45$ *мкф/см*³, а при толщине 1,5 *мкм* — 0,98 *мкф/см*³. Для покрытия фольги использовался лак на основе полиизоцианата, наносимый с двух сторон фольги (этот лак по составу близок к полиуретановому); металлизация, в отличие от немецкой практики, проводилась только с одной стороны. Система контактирования была такой же — с использованием вытравливания одного края фольги перед металлизацией.

Испытание на длительную работу и хранение проводилось в течение 20 000 ч при напряжениях 0, 24, 50, 100 и 150 *в* и температурах 50, 70 и 80°C . Катастрофического числа пробоев ни при одном из этих режимов не наблюдалось. Изменения емкости и $\text{tg } \delta$ были весьма малы. Постоянная времени оставалась высокой при хранении без напряжения при 50 и 70°C , но при 80°C наблюдались выпадения до 10 *сек*. При напряжении 150 *в* постоянная времени практически не менялась, но при 50

и 100 в наблюдалось ухудшение средних значений. При замене цинкового покрытия алюминиевым поведение конденсаторов при длительной работе и хранении заметно улучшилось, в связи с чем в дальнейшем была принята металлизация алюминием. На основании проведенных испытаний при толщине пленки 3 мкм установлено $U_{\text{ном}} = 50 \text{ в}$ ($E_{\text{раб}} = 16,6 \text{ кв/мм}$) и при 5 мкм $U_{\text{ном}} = 100 \text{ в}$ ($E_{\text{раб}} = 20 \text{ кв/мм}$). При этих напряжениях в работе практически не должно быть пробоев и самовосстановлений. Если их допустить, то можно дополнительно повысить рабочую напряженность.

Судя по старому патенту¹, разработка металло-лаковых конденсаторов проводилась и в Японии. Благодаря малому удельному объему, нагревостойкости и хорошим электрическим характеристикам эти конденсаторы были рекомендованы для применения в полупроводниковой аппаратуре.

По-видимому, в настоящее время время металло-лаковый конденсатор не выдержал конкуренции с лакопленочным с удаленной подложкой и оказался неперспективным типом конденсатора.

Мы остановились здесь на рассмотрении этого типа конденсатора достаточно подробно, потому что саму идею тонкопленочного конденсатора с сохраненной металлической подложкой можно считать жизненной при использовании новых методов нанесения тонких пленок, позволяющих получать малые толщины с большей однородностью, чем это удается при лаковом методе. Часто можно заменять фольгу более тонкой изоляционной металлизированной подложкой, но не всегда: в частности, металлическая подложка будет необходима, если по условиям технологии нанесения тонкого слоя нужна высокая температура или иные условия, способные разрушить органическую подложку.

§ 28. Тонкослойные конденсаторы с сохраненной подложкой, изготовленные с использованием новых методов получения тонких слоев диэлектрика

Отложение пленки из суспензии с последующим спеканием. Описанные выше металло-лаковые конденсаторы дают возможность обеспечить верхний предел рабочей температуры только до 100° С. Дальнейшее повышение рабочей температуры этих миниатюрных конденсаторов можно было бы получить, применяя такой нагревостойкий материал, как политетрафторэтилен (ПТФЭ). Однако ПТФЭ нерастворим в обычных растворителях, а вопрос об его металлизации нашел свое решение лишь недавно, причем перед металлизацией необходимо проводить специальную обработку его поверхности. Поэтому при использовании этого диэлектрика для изготовления тонкопленочных

¹ Японск. пат., № 6932, 20.08.58, Судзуки Такэо.

конденсаторов пришлось отказаться от технологии металло-лаковых конденсаторов типа МЛ и искать новые пути.

В данном случае вместо лака можно взять суспензию ПТФЭ, нанести ее на фольгу в виде тонкого слоя, а затем подвергнуть термообработке для спекания и получения сплошного однородного слоя. Как указывалось выше, этот принцип был использован в США для получения свободных пленок с повышенной электрической прочностью путем снятия с металлической подложки после спекания. Если взять подложку в виде фольги малой толщины и оставить на ней тонкую пленку ПТФЭ, не снимая ее после спекания, то мы получим материал, аналогичный лакированной фольге, но обладающий более высокой нагревостойкостью и малым углом потерь. Такие пленки в США называют армированными. Алюминиевая фольга покрывается пленкой ПТФЭ с обеих сторон при толщине слоя на одну сторону от 1,5 до 12,5 мкм. При определении электрической прочности подобных пленок при испытании в четыре слоя (две ленты фольги с двусторонним покрытием) при постоянном токе, были получены значения $E_{пр}$, равные 300—350 кВ/мм.

Из таких пленок изготавливались конденсаторы емкостью от 0,001 до 1 мкФ, которые наматывались из двух лент фольги, изолированной тонкими слоями ПТФЭ (по схеме рис. 80, в, т. е. при двойной толщине диэлектрика между обкладками). При $2 \times 1,5$ мкм $U_{ном} = 100$ в или $E = 33,3$ кВ/мм, а при 2×3 мкм — 500 в или 83,5 кВ/мм. При толщине пленки 1,5 мкм получена $C_{уд} = 0,67$ мкФ/см² и $q_{уд} = 67$ мкК/см². Для таких конденсаторов $\tan \delta \approx 2-3 \cdot 10^{-4}$ и верхний предел рабочей температуры до 200—250° С.

Согласно американскому патенту¹ для нанесения тонких слоев ПТФЭ используется водная суспензия с размером частиц 0,06—0,4 мкм и некоторыми добавками. Фольга пропускается через ванну с суспензией, а затем проходит через печь, где происходит испарение жидкой фазы, выжигание добавок и спекание частиц ПТФЭ в однородное непрерывное покрытие. Толщина покрытия определяется концентрацией и вязкостью суспензии и скоростью движения фольги; температуру при спекании надо брать выше 327° С.

Получение пленки методом пиролиза. Метод пиролиза был использован для получения на фольге тонких слоев полипара-ксилилена, что было описано выше в гл. 2 (§ 14). На основе использования фольги с двусторонним покрытием пленкой полипара-ксилилена («парилена»), полученным этим методом, были разработаны конденсаторы, получившие обозначение МЛ-1.

Для изготовления конденсаторов были опробованы три типа конструкции: а) две изолированные ленты фольги, т. е. удвоенная толщина диэлектрика (рис. 80, г); б) одна изолированная

¹ Пат. США, кл. 29—529, № 2991550, 11.07.1961, Ч. Блок.

лента фольги и вторая — неизолированная, т. е. между обкладками только один слой диэлектрика, причем одна обкладка к нему прилегает неплотно (рис. 80, *б*); в) одноленточный конденсатор из двусторонне изолированной фольги, металлизированной с одной стороны, т. е. опять один слой диэлектрика между обкладками, но с плотным прилеганием обеих обкладок (рис. 80, *а*). Очевидно, наибольшую удельную емкость можно было получать при третьем варианте, но по-видимому, предпочтение было отдано первому как более простому, чем, третий, и более надежному в электрическом отношении, чем второй. Толщина фольги составляла около 4—6 мкм; толщина слоя диэлектрика — от 0,1 мкм; можно полагать, что практически применялись значения толщины не ниже 1 мкм.

Контактирование намотанных секций проводилось обычным методом — напылением металла на торцы. Применялась герметичная конструкция корпуса конденсатора для предупреждения окисления пленки диэлектрика при повышенных температурах. Пределы рабочей температуры для конденсаторов типа ML-1: от -185 до $+175^{\circ}\text{C}$; постоянная времени при 25°C выше 10^6 сек и 75 сек при 175°C ; ТКЕ меньше $-100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; коэффициент абсорбции 0,1% (в тех же условиях для поликарбоната — 0,2%, а для ПЭТФ — 0,3%). Номинальное напряжение конденсаторов было установлено равным 70 в при 125°C и должно было снижаться до 50 в при 175°C . После испытания на 1000 ч работы при 125°C и напряжении 50 в изменение емкости составило +1%, а $\text{tg } \delta$ изменился на $3 \cdot 10^{-4}$. По нагревостойкости конденсатор ML-1 уступает тефлоновому, но имеет объем в 10 раз меньше (при напряжении, соответственно, 50 и 200 в).

В обзоре Кепера по конденсаторам постоянной емкости, выпускаемым в США и опубликованном в 1968 г., среди прочих типов пленочных конденсаторов упоминаются и «тонкослойные париленовые конденсаторы» (по-видимому, свободная пленка из этого диэлектрика не привилась в конденсаторостроении). Для таких конденсаторов Кепер приводит следующие характеристики: пределы номинальной емкости — от 1000 пф до 1 мкф, допуск по емкости $\pm 10\%$ (по специальному заказу до +1%), номинальное напряжение 35—75 в, испытательное напряжение — двойное рабочее, удельный заряд — от 5 до 10 мкк/см³, пределы рабочей температуры: от -55 до $+125^{\circ}\text{C}$, $\text{tg } \delta$ равен $5-15 \cdot 10^{-4}$ при 25°C и 1 кГц и $7-15 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 МГц; постоянная времени — 10^5-10^6 сек. В этих данных обращает на себя внимание прежде всего заметно суженный интервал рабочих температур по сравнению с указанным в 1964 г. Тем не менее можно полагать, что конденсаторы этого типа находят себе известное место в конденсаторостроении США.

Полимеризация в газовом разряде. Оригинальным методом получения весьма тонких пленок ПТФЭ для изготовления ма-

логабаритных конденсаторов явился метод полимеризации в газовом разряде. Установка для изготовления опытных конденсаторов данного типа, использованная в работе Гранда и Крауса, показана на рис. 81. В цилиндрическом сосуде, поставленном под колокол вакуумной установки, помещались рамки для зажима ленточных подложек, на которые должны были наноситься тонкие пленки ПТФЭ. Под колокол через проход-

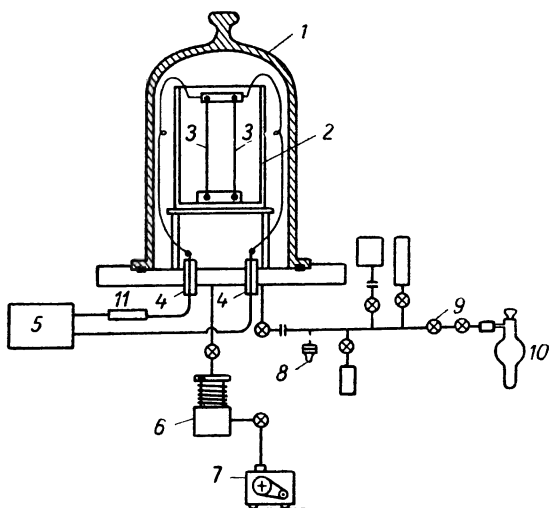


Рис. 81. Схема установки для нанесения тонкого слоя ПТФЭ методом полимеризации в тлеющем разряде

1 — вакуумный колокол; 2 — цилиндрический сосуд; 3 — рамки с подложками; 4 — телефонные изоляторы для ввода напряжения; 5 — источник переменного напряжения для создания разряда; 6 — диффузионный насос; 7 — ротационный насос; 8 — выпуск воздуха или газа; 9 — игольчатый клапан; 10 — сосуд с мономером; 11 — ограничительный резистор, 10 *ком*, 10 *вт*

ные изоляторы из тефлона вводилось переменное напряжение от источника с максимальным напряжением 800 *в* и максимальным током 800 *ма* (частота 60 *гц*). Это напряжение создавало тлеющий разряд между электродами, помещенными внутри цилиндрического сосуда. В стеклянной колбе собирались газообразные фторированные продукты разложения тефлонового порошка, которое осуществлялось путем пиролиза. Эти газообразные продукты (мономер) подавались далее под колокол, где в условиях тлеющего разряда происходила полимеризация, причем образующийся полимер тонким слоем осаждался на подложке.

В качестве подложки использовались ленточки «майлара» длиной 300 *мм* и толщиной 6,5 *мкм*, покрытые слоем алюминия,

служащего первой обкладкой опытного конденсатора; второй обкладкой служил слой алюминия, также нанесенный испарением в вакууме поверх тонкой пленки ПТФЭ, осажденной на подложку. Схема устройства такого конденсатора соответствует рис. 79, *г*, если рассматривать подложку состоящей не из двух, а из одного слоя.

Были испытаны также конденсаторы с двусторонним покрытием подложки пленками ПТФЭ, по схеме рис. 79, *а*, в которых полярная подложка заэкранирована и не попадает в электрическое поле, что дает улучшение электрических свойств конденсатора.

Емкость опытных конденсаторов лежала в пределах 0,04—0,08 *мкф*. Толщина пленок ПТФЭ варьировалась в процессе исследования в пределах от 0,75 до 2 *мкм*. Опытные конденсаторы успешно выдержали длительное испытание при напряжении 45 *в* и температуре 85°С. Исследование изменения емкости и сопротивления изоляции двух опытных конденсаторов, в зависимости от напряжения, при ступенчатом его повышении с выдержкой на каждой ступени по несколько минут показало, что до 70—75 *в* изменения электрических свойств оказались незначительными. Эти данные соответствуют пленке толщиной 1,25 *мкм*. Таким образом, в данном случае существенных изменений электрических свойств не происходило до напряженности поля 55—60 *кв/мм*. Несколько образцов были испытаны на работу при постоянном напряжении 73 *в* и температуре 125°С. После 400 *ч* работы четыре образца имели постоянную времени выше 400 *сек*, один имел 170 *сек* и один 50 *сек*.

Авторы полагали, что, используя подложку пониженной толщины и многослойную конструкцию (подобную показанной на рис. 79, *д*), при толщине пленки 1 *мкм* можно получить удельную емкость до 12 *мкф/см³*. Тангенс угла потерь опытных конденсаторов составлял 30—70 · 10⁻⁴; при улучшенной надежности контакта авторы надеялись снизить это значение до 15—30 · 10⁻⁴. Можно думать, что в данном случае получаемую на подложке пленку можно было лишь условно называть пленкой ПТФЭ, так как исходным продуктом был не чистый мономер тетрафторэтилена, а смесь низкомолекулярных фторорганических соединений, полученных при пиролизе ПТФЭ. Этим можно объяснить и повышенные потери конденсаторов по сравнению с тефлоновыми конденсаторами и осторожный подход авторов к выбору рабочей температуры для опытных конденсаторов, хотя в последнем случае могла играть роль и пониженная нагревостойкость майларовой подложки, сохраняемой в конденсаторе.

Через год после опубликования работы Гранда и Крауса в США появилось сообщение о том, что разработана пленка тефлона толщиной 1 *мкм* под названием «глафилм». Однако

в отличие от указанных авторов отмечалось, что пленка получена при воздействии высокочастотного тлеющего разряда (а не разряда при 60 гц). Пленка использована в конденсаторах, которые имеют объем на 25% меньше обычных конденсаторов из металлизированной пленки «майлар» толщиной 6 мкм; рабочая температура конденсаторов — до 125° С. Больше об этих конденсаторах сообщений найти не удалось, так что, вероятно, они не были еще доведены до стадии массового производства.

Во всяком случае в достаточно полном обзоре Кепера (1968 г.) об этих конденсаторах не упоминалось.

Тем не менее идея получения однородных тонких пленок для конденсаторостроения путем полимеризации мономера в тлеющем разряде продолжает привлекать внимание как изобретателей, так и научных исследователей. В 1963 г. была опубликована работа Бадлева и Хаммса, в которой описаны результаты исследования проводимости тонких органических пленок, полученных полимеризацией в газовом разряде на металлизированных подложках из кварцевого стекла; вторым электродом служил тонкий слой металла (алюминия), нанесенный испарением в вакууме уже после образования пленки. Разряд создавался в вакуумной камере между двумя металлизированными подложками, зажатыми в держателе из тефлона, причем пленки образовались на обеих подложках, т. е. сразу получалось по два образца. Камера откачивалась до 10^{-5} торр, после чего через игольчатый клапан в нее вводились пары органических веществ, давление которых поддерживалось на уровне 0,5—1 торр. Напряжение, создающее разряд, в зависимости от давления в камере и типа исследуемого вещества составляло от 275—305 до 450—455 в; частота 10—50 кГц, плотность тока 1—3 мА/см²; размер подложки 1×25×75 мм; толщина исследуемых пленок выбрана равной 1—2 мкм; при меньших толщинах пленки имели много слабых мест, а при больших — часто отслаивались от подложки.

Твердая пленка, получаемая в условиях разряда, образуется независимо от наличия свободных связей или реакционных групп в исходном мономере, хотя наличие свободных связей ускоряет процесс образования пленки. Можно полагать, что при воздействии разряда образуются ионные и ионно-радикальные обрывки молекул, рекомбинирующие при их накоплении на электродах. Образуется трехмерная структура, имеющая нерегулярное, но однородное строение. Быстрее всего возникают пленки из ненасыщенных и ароматических соединений, медленнее всего — из насыщенных алифатических соединений, особенно пергалогенированных углеводородов. Авторы оценивали скорость образования пленки величиной массы, выделенной на единицу израсходованной электроэнергии: эта величина колебалась в пределах от 3—5 до 200—300 г/квт·ч.

Емкость образцов составляла от 0,003—0,004 до 0,1 мкф; при толщине 1—2 мкм пленки выдерживали напряжение 50 в (постоянный ток), не пробиваясь. При температуре 150°С большинство образцов (было обследовано около 40 соединений) имели проводимость в пределах от 10^{-14} до 10^{-16} ом⁻¹·см⁻¹. Для образца из трихлорбензола было получено 10^{-17} , а для образца из ферроцена 10^{-13} ом⁻¹·см⁻¹. Энергия активации для большинства образцов составляла $1,36 \pm 0,06$ эв. Наличие в образцах до 10% кислорода практически не влияло на величину проводимости.

В более поздней работе Стюарта (1965 г.) исследованы потери в пленках полистирола толщиной 1 мкм, полученных осаждением паров стирола на подложку в виде алюминиевой фольги толщиной 20 мкм при комнатной температуре в вакууме ($p = 2 \cdot 10^{-5}$ торр) и полимеризации осажденного стирола под действием тлеющего разряда (частота 180 кГц). Второй алюминиевый электрод наносился на пленку испарением в вакууме. В интервале частот от 10^2 до 10^5 гц получены значения $\epsilon \approx 2,65 \div 2,70$ и $\text{tg } \delta \approx 10 \div 30 \cdot 10^{-4}$.

Получение пленок этим методом проводилось также в присутствии кислорода или азота при повышенной температуре (80°С).

Было показано, что электрические свойства пленок не зависят от температуры полимеризации, но резко изменяются в зависимости от окружающей среды.

Применение метода получения тонких пленок в газовом разряде для изолирования металлической фольги с целью использования ее для изготовления конденсаторов предлагается в германском патенте¹. Способ пригоден для изготовления изолированной конденсаторной фольги со слоем пленки диэлектрика от 0,5 до 2 мкм.

В швейцарском патенте² предусматривается непрерывный процесс получения пленки в газовом разряде. Предлагается наносить изоляционное покрытие в виде тонкой полимерной пленки на подложке, перемещающейся на роликовом транспортере, путем полимеризации мономера в вакууме под действием коронного разряда. Полученная пленка может быть, если нужно, отделена от подложки, например, путем растворения последней.

Изготовление конденсаторов с диэлектриком в виде пленки, полученной в газовом разряде, описано и в американском патенте³.

В качестве диэлектрика используется пленка толщиной

¹ Пат. ФРГ, кл. 21g, 2/33, (H01g), № 1166309, 8.10.1964, Ф. Бейерлейн.

² Швейц. пат., кл. 21g, 2/30, (H01g), № 410086, 15.10.1966, Дж. Х. Ко-леман.

³ Пат. США, кл. 117—217, № 3252830, 24.05.1966, А. Кэммин, Ч. Э. Уоттс.

0,01—1 мкм, образующаяся при воздействии на газообразный мономер тлеющего разряда. В качестве примера указано получение пленки толщиной 0,2 мкм, образованной в тлеющем разряде в парах м-фтортолуола при напряжении 500 в постоянного тока, при давлении $14 \cdot 10^{-3}$ торр. Пленка наносилась на ленту ПЭТФ, покрытую алюминием. Поверх слоя диэлектрика также напылялся алюминий. Из ленты наматывалась конденсаторная секция, которая имела емкость 0,3 мкф и $\operatorname{tg} \delta = 25 \cdot 10^{-4}$ при 20°С и частоте 1 кГц; секция выдерживала напряжение 20 в постоянного тока, что соответствует $E = 100$ кв/мм.

В работе Да Сильва и Миллера исследован процесс получения тонких пленок полибутадиена методом тлеющего разряда. Процесс нанесения пленки состоит из введения в вакуумную камеру газообразного мономера с последующей полимеризацией его на антикатоде. С относительно большой скоростью удалось получать пленки толщиной 0,05—0,2 мкм, не дающие коротких замыканий и обладающие высокой надежностью. В процессе периодического нанесения при объеме системы 22 л и площади подложки 8 см² за 3 мин можно было получать пленку толщиной 400 Å, т. е. средняя скорость нанесения составляла около 2 Å/сек. В процессе непрерывного нанесения удалось поднять скорость до 15—20 Å/сек при токе 70—90 ма, напряжении 100—150 в и расстоянии от подложки до антикатада 50 мм. Рабочее давление паров бутадиена поддерживалось равным 100—150 торр при скорости подачи мономера около 100 мл/сек. При нанесении пленки из ПВХ скорость нанесения составляла 30 Å/сек, а пленки из полихлортрифторэтилена снижалась до 1 Å/сек.

Хотя в перечисленных выше источниках информации отмечается возможность получения однородных бездефектных пленок толщиной порядка десятых и даже сотых микрона, можно полагать, что при достаточно большой площади ленты, позволяющей изготовление конденсаторов намотанного типа, едва ли пока уверенно удастся получать пленки тоньше 1 мкм. Если принять, что в качестве подложки будет использована металлизированная пленка наименьшей возможной сейчас толщины, а именно поликарбонатная, 2 мкм, причем схема конструкции будет построена так, что в создании емкости будет участвовать также и подложка, то удельная емкость намотанной секции без учета ее конструктивного оформления может быть получена равной 15 мкф/см³. В этих же условиях для поликарбонатной пленки 2 мкм имеем удельную емкость 6,5 мкф/см³, а с учетом конструктивного оформления — 2 мкф/см³. Таким образом, при налаженном непрерывном процессе создания полимерных пленок в газовом разряде, при толщине 1 мкм, можно было бы рассчитывать на получение миниатюрных конденсаторов

с удельной емкостью примерно в 2—3 раза выше, чем это удается получать сейчас в условиях массового производства. Такая цель представляется достаточно интересной, чтобы добиваться ее реализации, а потому работы в этом направлении ведутся в ряде стран, но, по-видимому, еще не доведены до реального производства. Можно, однако, полагать, что этот метод изготовления конденсаторов является прогрессивным и будет внедрен в конденсаторостроение.

Очевидно, задачу получения тонкой и однородной пленки данным методом легче разрешить, если не ставить задачу создания намотанного конденсатора, а удовлетворяться получением небольшого конденсатора плоского типа на малой площади подложки для его использования в плоских микросхемах. Такая задача была поставлена в работе Скиннера (1968 г.) с целью замены танталовых оксидно-металлических конденсаторов, обладающих высокими потерями ($\operatorname{tg} \delta$ обычно выше $100 \cdot 10^{-4}$), и конденсаторов с диэлектриком из напыленной монооксида кремния, которые трудно получать без большого числа сквозных дефектов и механических напряжений, приводящих к растрескиванию. Применение многослойного конденсатора, имеющего повышенную емкость, на основе монооксида кремния затрудняется тем, что выжигание слабых мест обычно приводит к повреждению нескольких слоев диэлектрика, что заканчивается необратимым закорачиванием обкладок. Используя тонкую полимерную пленку, полученную в условиях газового разряда и обладающую большой сплошностью и однородностью, можно изготавливать многослойные конденсаторы с удельной емкостью на единицу площади обкладок до $0,1 \text{ мкф/см}^2$ при электрической прочности выше 100 кВ/мм .

В этой работе для получения пленок использовались не чисто органические, а кремний-органические соединения (полисилоксаны). В качестве исходного мономера был, в частности, опробован диметилсилоксан с температурой кипения 150°C . Толщина полученных пленок составляла $0,15 \text{ мкм}$, толщина алюминиевых обкладок $0,2 \text{ мкм}$, диаметр обкладок 2 мм ; выводы от каждой обкладки осуществлялись золото-хромовым сплавом. Сравнение свойств конденсаторов с таким полимерным диэлектриком со свойствами обычных конденсаторов из монооксида кремния дано в табл. 20. Скорость отложения пленки была доведена до $15\text{—}17 \text{ \AA/сек}$.

Для конденсаторов с полимерным диэлектриком в пределах температур от 10 до 140°C величина ТКЕ составляла $\sim 1000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Уход емкости при хранении в течение 2 мес. зависел от условий получения и составлял от 2 до 10%.

Разряд при переменном напряжении дает пониженное значение $\operatorname{tg} \delta$, но со временем оно возрастает до $50 \cdot 10^{-4}$, а при больших скоростях отложения даже до $100 \cdot 10^{-4}$; разряд при по-

Характеристика	Диэлектрик		
	полимер		моноокись кремния
	1 слой	7 слоев	
Толщина диэлектрика, <i>мкм</i>	0,15	$7 \times 0,15$	0,10
Удельная емкость, <i>мкф/см²</i>	0,015	0,10	0,01
$\text{tg } \delta \cdot 10^4$, при 1 <i>кГц</i>	30—60	50	100—400
$E_{\text{пр}}$, <i>кв/мм</i>	выше 100	выше 100	выше 100
Диэлектрическая проницаемость	2,5	2,5	5—6

стоянном напряжении обеспечивает значение $\text{tg } \delta$ около $50 \cdot 10^{-4}$, стабильного во времени. Рабочее напряжение конденсаторов 10 в, что соответствует $E_{\text{раб}}$, равной 67 *кв/мм*; выход годных конденсаторов в условиях лабораторного изготовления составил 90%.

Эти данные подтверждают определенные преимущества полимерных конденсаторов перед конденсаторами из монооксида кремния и показывают целесообразность использования подобных конденсаторов в качестве составного элемента плоских микросхем.

Разработка подобных конденсаторов на основе использования органических полимеров описана в работе Озава, опубликованной в 1969 г. При толщине диэлектрика 0,1 *мкм* величина $C_{\text{уд}} = 170 \text{ нф/мм}^2$; $\text{tg } \delta = 20 \cdot 10^{-4}$ для частот до 10^5 Гц , ТКЕ менее $-200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, изменение емкости после старения в течение 1000 ч при 80°C под напряжением составляет 1%. При значениях $C_{\text{уд}} = 100\text{—}200 \text{ нф/мм}^2$ пробивное напряжение при постоянном токе равно 50—75 в.

Вероятно, можно себе представить и иные способы получения весьма тонких полимерных пленок для их использования при изготовлении конденсаторов. Так, в обзорной работе Явитца упоминается о получении полимерных пленок толщиной от 0,01 до 1,2 *мкм* путем ультрафиолетового облучения металлических поверхностей, находящихся в контакте с парами дивинилбензола (метод фотополимеризации). Можно полагать, что в будущем подобные методы найдут практическое применение в конденсаторостроении и в микроэлектронике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделанный выше обзор современного состояния вопроса о применении органических синтетических пленок в конденсаторостроении показывает быстрое развитие применения диэлектриков этого типа для изготовления разнообразных видов конденсаторов. Схематическое изображение применяемости синтетических пленок в производстве обычных, комбинированных и

Наименование диэлектрика		ϵ	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	Типы конденсаторов				
				обычные		комбинированные	тонкопленочные	
				фольговые	металлизированные		с удаленной подложкой	с сохраненной подложкой
Полярные	Конденсаторная бумага	3,5—6,5	85/125	+	+	+	—	—
	Цианэтилцеллюлоза	10—15	60/70	—	—	—	×	—
	Полиуретан	3,9	85	—	—	—	—	+
	Триацетат и ацетобутират	3,5—4	85/125	+	—	+	+	—
	Поликарбонат	2,8—3	100/140	+	+	+	×	—
	Полиэтилентерефталат	3,2—3,4	85/100	+	+	+	—	—
	Полисульфон	3,0	175	—	—	—	—	×
	Полипиромеллитимид	3,4	200	×	—	—	—	×
Неполярные	Полистирол	2,5	70/85	+	+	+	+	×
	Сополимер САМП	2,5	85/100	—	+	—	—	—
	Полиэтилен	2,2—2,3	85/100	+	—	+	—	—
	Полипропилен	2,2—2,3	100/125	+	+	+	—	—
	Полифениленоксид	2,5—2,6	125	—	—	—	—	+
	Полипараксилилен	2,7	125/175	—	—	—	—	+
	Сополимер FEP	2,1	175	—	+	—	—	—
	Политетрафторэтилен	2,0	150/200	+	+	+	—	+

Примечание. + промышленный выпуск; × лабораторные образцы или мелкие серии; — не применяется.

тонкопленочных конденсаторов показано в табл. 21. В этой таблице можно насчитать 15 наименований различных полимеров, которые уже можно считать внедренными или успешно внедряющимися в конденсаторное производство.

Следует также учесть, что многие полимеры применяются теперь как в комбинации с бумагой, так и друг с другом, как показано схематически на рис. 82 (ПТФЭ — политетрафторэтилен, ППР — полипропилен, ПЭ — полиэтилен, ПС — полистирол, ПЭТФ — полиэтилентерефталат, ПК — поликарбонат, ТАЦ — триацетат целлюлозы). Этот рисунок показывает нам 10 комбинаций, которые уже нашли практическое применение.

Таким образом, современное конденсаторное производство располагает набором синтетических пленок и их комбинаций с бумагой и друг с другом (около 25 наименований) с различными свойствами, позволяющими применять пленки как при низкой частоте и постоянном токе, так и при высокой частоте; как при малых напряжениях, примерно 12—20 в, так и при сотнях киловольт; как с малой реактивной мощностью, так и с мощностью 100—150 квар и выше; можно изготовлять пленочные конденсаторы с ТКЕ очень малым, около $\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и с ТКЕ, лежащим в широких пределах величин от -800 до $+500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Можно думать, что с течением времени номенклатура пленочных диэлектриков будет и дальше расширяться, учитывая быстрый прогресс современной химии синтеза.

Поэтому можно ожидать, что в ближайшем будущем пленочные диэлектрики по своему разнообразию и по широте использования будут играть в конденсаторостроении такую же важную роль, какую играют сейчас керамические материалы. Высокие значения ϵ современных керамических материалов и появление монолитной конструкции, позволившей значительно снизить толщины керамического диэлектрика, дают возможность приблизить значения $C_{уд}$ при небольших напряжениях к тем значениям, которые дают бумага и синтетические пленки. Однако можно думать, что даже при малых напряжениях создание больших номинальных емкостей с такими свойствами, которые не могут обеспечить электролитические конденсаторы, будет осуществляться за счет конденсаторов намотанного типа с полимерным диэлектриком. Что касается области высоких и сверхвысоких напряжений при достаточно больших емкостях, то здесь на долгие годы можно считать полимерный диэлектрик незаменимым,

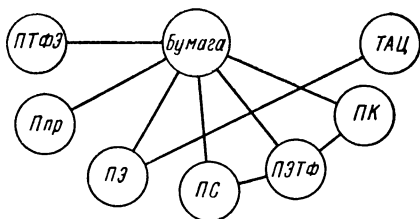


Рис. 82. Схема различных вариантов комбинации синтетических пленок с бумагой и друг с другом

ЛИТЕРАТУРА

К главе первой

1. В. Т. Ренне. Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. Госэнергоиздат, 1963.
2. М. А. Матевосян. Исследование короностойкости пленочных изоляционных материалов. Сб. Пробой диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, 1964, 311—315.
3. С. Н. Койков и др. Роль кислорода при разрушении полимерных пленок под действием разрядов. Там же, 301—306.
4. С. Н. Койков и др. Изменение пробивного напряжения, толщины и веса полимерных пленок при ионизационном старении. Там же, 307—310.
5. Д. М. Казарновский. Потери в обкладках конденсаторов. Изв. вузов, Электромеханика, 1964, № 11, 1297—1304.
6. Какимото Акиро, Итидзо Бундзиро. Измерение электрических свойств тонких пленок. Ж. Инст. Инж. Эл. Японии, 1966, 86, № 5, 830—836 (РЖЭ, 1966, 12Б73).
7. В. Т. Ренне. Современное конденсаторостроение. Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 126—146.
8. А. Т. Оганесян. О коэффициенте абсорбции для электрических конденсаторов. Труды ЛПИ, 1966, № 258, 132—138.
9. Э. М. Костенко. Исследование электрических свойств некоторых нагревостойких синтетических пленок, применяемых в конденсаторостроении. Труды ЛПИ, 1967, № 276, 21—26.
10. С. Н. Койков и др. Исследование роли разрядов в процессе старения полимерных пленок в постоянном электрическом поле. Там же, 26—32.
11. С. Н. Койков и др. Изменение инфракрасных спектров в процессе ионизационного старения полимерных пленок. Там же, 32—39.
12. С. Н. Койков и др. Лабораторная методика исследования закономерностей электрического старения полимерных пленок. Там же, 78—84.
13. Итоги науки и техники. Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели, 1966—1967. Синтетические полимеры в электрической изоляции. ВИНТИ, 1968.
14. М. А. Матевосян. О механизме старения полимерных пленок под воздействием разрядов. Сб. Труды Ерев. политехн. ин-та, 1967, 24, 53—58 (РЖЭ, 1968, 8Б37).
15. С. Н. Койков, А. Н. Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков. «Энергия», 1968.
16. В. Т. Ренне. Электрические конденсаторы. Энергия, 1969.
17. В. Т. Ренне, Ш. А. Дарбинян. Электризация синтетических пленок, применяемых в конденсаторостроении. Изв. вузов, Энергетика, 1969, № 9, 23—27.
18. В. Т. Ренне, Ш. А. Дарбинян. Влияние электризации синтетических пленок, при изготовлении намотанных конденсаторов. Электричество, 1970, № 2, 74—78.
19. D. D. Kasarda. Insulating films and fibrous materials. Digest literat. dielectrics, 1961, vol. 25, 345—358 (РЖЭ, 1963, 10Б97).

20. V. Adamec. Merny vnútorný odpor elektroizolačných organických materialov pri ožarovani. Bull. VUKI, 1962, 15, № 6, 325—334.

21. P. Boyer. Aspects de la recherche dans une fabrique Suisse de condensateurs. Bull. Schweiz. El. Verein., 1962, 53, № 24, 1170—1178 (PЖЭ, 1963, 5Б121).

22. C. B. Charlton. T. E. Shen. Plastic-film dielectric capacitors. Proceed. IEE, 1962, B 109, Suppl., № 22, 476—487 (PЖЭ, 1962, 22Б71).

23. F. C. Eirich, H. F. Mark. New resins for electrical applications. Power Appar. and Systems, 1962, № 60, 183—185.

24. J. F. Ferrante. Capacitance and capacitors. "Electronics", 1962, 35, № 19, 61—62 (PЖЭ, 1962, 24Б 80).

25. M. Mikić. Mogućnost zamene papirnih kondenzatora kondenzatorima od sintetičkih folija. "Technika", 1962, 18, № 2; Elektrotehnika, 1962, 18, № 2, 31—36.

26. Metallisierte Kunststoff-Kondensatoren. Export-Markt, "Elektrotechnik", 1962, 42, № 21, 17.

27. Uchida Yoshio. Condensers in Japan; Electronic part serie. "Radio & TV", 1962, 5, № 4, 57—60.

28. A. H. Sharbaugh. DC conduction in polymeric insulation. El. Insul. Conf. Mater. and Appl., Wash., 1962, SI, 81—82 (PЖЭ, 1963, 9Б39).

29. A. Galletti. Pellicole polimeriche come dielettrici; Materie plast. ed elastomeri, 1963, № 7, 984—990 (PЖЭ, 1964, 1Б70).

30. A. Grosschmidt. Presné meranie dielektrickej konštanty na tenkých foliách z umelych hmôt. Bull. VUKI, 1963, 16, № 5, 228—234 (PЖЭ, 1964, 7Б75).

31. A. Javitz. Perspectives in insulation-application trends and problems. "Elektro-Technol.", 1963, 72, № 3, 84—89 (PЖЭ, 1964, 6Б55).

32. T. L. Pestel. Plastic dielectrics in capacitors. Electron Inds., 1963, 22, № 6, 21—24 (PЖЭ, 1964, 2Б84).

33. O. Wiegand. Kunststoff Kondensatoren. Siemens Zeitschrift, 1963, 37, № 4, 339—341 (PЖЭ, 1963, 11Б74).

34. W. Woboditsch. Glimmbeständigkeit von Kunststoffolien. "Elektrie", 1963, 17, № 10, 331—332 (PЖЭ, 1964, 4Б81).

35. Yu Liang-Tse. Conductivité en courant continue des substances macromoleculaires. Journ. Phys., 1963, 24, № 5, 330—340 (PЖЕ, 1964, 9Б63).

36. V. Adamec. K mechanismu anomálnej elektrickej vodivosti polymer-ných dielektrik. Slaboproudý Obzor, 1964, 25, № 6, 336—339 (PЖЭ, 1969, 1Б66).

37. Z. Bendeković. Suvremeni motani kondenzatori iz umjetnich mas. "Technika", 1964, 19, № 6. "Elektrotehnika", 1964, 13, № 6, 130—135 (PЖЭ, 1965, 2Б108).

38. P. Boyer. Fortschritte in Kondensatorbau. "Techn. Rundschau", 1964, 54, № 15, 9—31 (PЖЭ, 1964, 10Б136).

39. S. German. Kapazitätssmessung mit dünnen dielektrischen Folien. ETZ, B, 1964, 16, № 15, 441—444 (PЖЭ, 1965, 6Б69).

40. J. Kammermaier. Untersuchungen der Umsetzungsprozesse bei Durchschlägen im Kondensatoren mit metallisierten Dielektrikum. "Frequenz", 1964, 18, № 5, 145—150.

41. Z. Perkowski. Zagadnienia stratności kondensatorów zwijkowych. Biul. Kablowy, 1964, 8, № 4, 86—93 (PЖЭ, 1965, 4Б65).

42. Advances in plastics and insulation. "Electron. Pack and Prod.", 1965, 5, № 4, 74—80 (PЖЭ, 1966, 1Б67).

43. R. Bergmann. Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiete der Isoliertechnik mit Kunststoffen. "Techn. Mitt.", 1965, 58, № 5, 211—216 (PЖЭ, 1965, 12Б62).

44. W. W. Difenbach. Moderne Kondensatoren für elektronische Geräte. "Elektro-Techn.", 1965, 47, № 21, 443—447 (PЖЭ, 1966, 1Б102).

45. J. H. Du Bois. Insulation breakthrough. Proceed. 6th El. Ins. Conf., 1965, IEEE, 1965, 22—25 (PЖЭ, 1966, 2Б60).

46. B. Fallou, B. Bouvier. Expérience sur la conductivité des polymères en films minces. "Revue Gener. d'Electr.", 1965, 74, № 12, 1022—1026 (PЖЭ, 1966, 6Б74).

47. J. R. Fisher. Notable advances in capacitors made in past years. Space. Aeronaut., 1965, 43, № 2, 73 (PЖЭ, 1965, 10Б98).

48. W. C. Lamphier. Plastic-film capacitors. "Electron. World", 1965, 74, № 1 (PЖЭ, 1966, 1Б107).

49. J. J. Mc Keon. Intrinsic electric strength of organic polymeric materials. Proceed. IEE, 1965, 112, № 4, 824—828 (PЖЭ, 1965, 10Б52).

50. P. Valkeila. Power losses in the electrode foils of capacitor windings. Sakō, 1965, 39, № 3, 103—106 (PЖЕ, 1965, 10Б52).

51. W. K. Volkers. E. N. Willie. Dielectric corruption in nylon, teflon, polystyrene and other high quality capacitors; IEEE Intern. Conf. Record, 1965, 13, № 10, 57—66 (PЖЭ, 1966, 1Б100).

52. 1966 Capacitors developments. Evaluat. Engng. 1965, 5 № 5, 39—40 (PЖЭ, 1967, 5Б127).

53. A survey of capacitor types. Electron. Engrs. Design Mag., 1966, 11, № 5, 148—150, 153—158 (PЖЭ, 1967, 2Б106).

54. J. Artbauer, J. Griač. Čisto elektrická pevnost plastických hmôt. "Elektroizol. a. Kabl. Techn.", 1966, 19, № 3, 163—174 (PЖЭ, 1967, 3Б47).

55. J. Artbauer, J. Griač. The intrinsic electric strength of polymers and its relation to the structure. Part I, Acta Techn. ČSAV, 1966, № 3, 416—428; Part II, Acta Techn. ČSAV, 1966, № 3, 429—439.

56. A. Kakimoto, B. Ichito. Measuring dielectric characteristics of thin films. "El. Engng Japan", 1966, 86, № 5, 65—71 (PЖЭ, 1967, 7Б118).

57. L. A. Liebowitz. Plastics in electrical insulation. SPE-Journal, 1966, 22, № 6, 34—36 (PЖЭ, 1966, 12Б75).

58. H. Strosche. Der Kondensator, ein elektrischer Bauelement mit vielen Gesichtern. Elektro-Techn., 1966, 48, № 30, 711—715 (PЖЕ, 1967, 3Б110).

59. T. Tanaka, Y. Inuishi. Effects of traps on electrical properties of polymeric insulation materials. El. Engng Japan, 1966, 86, № 7, 1—10 (PЖЭ, 1967, 10Б74).

60. R. S. Vincent. Effect of moisture on capacitors assemblies. Electron. Components, 1966, 7, № 6, 177—179 (PЖЭ, 1966, 12Б162).

61. Basic properties charts of fixed capacitors. Electron. Engrs Design-Mag., 1966, 11, № 5, 140—148 (PЖЭ, 1967, 2Б107).

62. Capacitors the daily double. TV and computers "Electron. News", 1967, 12, № 605, 2, 30 (PЖЭ, 1968, 1Б116).

63. Discrete capacitors. "Electro-Technol." USA, 1967, 80, № 6, 69—70 (PЖЭ, 1968, 8Б90).

64. B. P. Kang. Plastic films for high stress capacitors and cables a review. "Insulation", 1967, 13, № 6, 30—32 (PЖЭ, 1968, 2Б134).

65. D. A. Mc Lean. Dielectric materials and capacitor miniaturisation. IEEE Trans. Parts. Mat. and Pack., 1967, 13, № 4, 163—169.

66. P. Nowak, E. Rickling. Kunststoffentwicklungen und elektrische Isolationen; "Elektrowelt", 1967, P12, № 18, 361—368 (PЖЭ, 1968, 5Б47).

67. Film capacitors. Electron Engr, 1967, 26, № 10, 102, (PЖЭ, 1968, 6Б106).

68. P. Freundlich. Folie elektroizolacyjne dla potrzeb przemyslu elektrotechnicznego. "Przegl. Elektrotechn.", 1967, № 9, 392—394 (PЖЭ, 1968, 6Б25).

69. A. C. Lilly, J. C. Mc Donald. High field conductivity in mylar and teflon films. J. El. Chem. Soc., 1967, 114, № 8, C207.

70. N. F. Jackson. Dielectric materials in capacitors. Component Technology, 1967, 2, № 8, 5—13 (PЖЭ, 1968, 8Б92).

71. J. Göblös. Some problems of the stability and operation reliability of up-to-date plastic dielectric capacitors. Prep. of the Sec: Symp. of Reliab, in Electronics, vol. C, Budapest, 15—18 oct., 1968, 309—310,

72. B. Koepfer. Fixed capacitors: now and in 69. EDN, 1968, № 13, 49—50.
73. J. D. Lacey. Characteristics of fixed capacitors. Electron. Compon., 1968, 9, № 1, 89—90.
74. F. Liebscher, W. Held. Kondensatoren: IIIA, Der Kunststoffkondensator, 249—254. Springer Verlag, Berlin, 1968.
75. E. J. McMahon. The Chemistry of corona degradation of organic insulating materials in high voltage fields and under mechanical strain. IEEE Trans. El. Ins., 1968, 3, № 1, 3—10 (РЖЭ, 1968, 10Б81).
76. C. Paris, A. Pigeonnier. Tendence dans l'évolution des condensateurs utilisée dans le matériel de transmission. Cables et Trans., 1968, 22, № 1, 38—62.
77. V. T. Renne. Dielectric absorption in capacitors. Electron. Compon. 1968, № 8, 911—912.
78. M. Braguier. Condensateurs à diélectrique plastiques metallisées. L'Onde électrique, 1968, 48, № 493, 358—366.
79. E. Felsing. Kunstfolien Kondensatoren und ihre Anwendung. Radio-Mentor, 1969, 35, № 2, 096—098.
80. Gottlob Heunrich, Keßler Hartmut. Impulsbelastbarkeit von metallisierten Kunststofffolien-Kondensatoren. "Siemens-Bauteile-Inforn.", 1970, 8, № 2, 66—69. Diskuss., 69.

К главе второй

1. Е. Л. Гинзбург. Пленочные силовые конденсаторы. Сб. Развитие силового конденсаторостроения. ЦИНТИЭП, 1962, 148—160.
2. С. Н. Койков и др. Электрическое старение политетрафторэтилена. Изв. вузов, Физика, 1963, № 2, 31—37.
3. Ямагами Синози. Конденсаторы с диэлектриком из облученного полиэтилена. Денси Дзайре, 1963, 2, № 4, 64—67 (РЖЭ, 1963, 12Б139).
4. С. А. Абасов и др. Исследование влияния электрического поля на диэлектрик. Механические свойства полистирольной пленки. Изв. АН Азерб. ССР, сер. физ., 1965, № 3, 137—143 (РЖЭ, 1966, 4Б32).
5. Г. А. Ермилова, М. Б. Нейман. Влияние стабилизаторов на диэлектрические свойства полипропиленовой пленки. «Электричество», 1966, № 7, 82—83 (РЖЭ, 1966, 12Б72).
6. Е. Л. Литвинова. Импульсные малоиндуктивные пленочные конденсаторы высокой добротности. Труды ЛПИ, 1967, № 276, 169—178.
7. П. Н. Щербак, Г. Б. Шпаковская. О влиянии степени ориентации на электрическую прочность тонких полистирольных пленок. Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 231—235.
8. С. Н. Колесов и др. Зависимость электрической прочности полистирола от молекулярного веса. Докл. Узб. АН ССР, 1967, № 5, 19—21 (РЖЭ, 1967, 10Б70).
9. C. A. Bozzini, P. P. Bayard. Polystyrene medium frequency power capacitor. El. Ins. Conf. Mat. and Appl., 4th Conf., Wash., 1968, SA, 141—144.
10. E. Gwinner. Polyolefin-Folien für die Elektroisolierung. ETZ, 1962, B14, 673—679, 2—3 (РЖЭ, 1963, 8Б87).
11. I. Kerpán, G. Toth. A lagnedvesseg hatasa a polistírolkondenzátorok kapacitására. Híradastechn., 1962, 13, № 5, 186—197 (РЖЭ, 1963, 4Б100).
12. M. Jabłoński. Teflon- jego własności i zastosowanie w elektrotechnice. Wiadom. Elektrotechn., 1962, 30, № 4, 93—96 (РЖЭ, 1962, 21Б74).
13. V. Adamec. The anomalous and steady state conductivity of polytetrafluoroethylene under irradiation. Dielectrics, 1963, 1, № 3, 159—160 (РЖЭ, 1964, 3Б39).
14. E. C. McMahon, J. E. Perkins, C. E. Jolley. High voltage behaviour of fluorocarbon resins. E. Ins. Conf. Mat. and Appl., 5th Conf., 1963, 56—59 (РЖЭ, 1963, 12Б70).

15. A. P. Mannion. Properties and applications of fluorinated ethylene-propylene (FEP) polymer. Resin News, 1963, 3, № 3, 7—9 (РЖЭ, 1964, 9Б68).
16. E. R a c z k o w s k i. Wyniki badań stabilności i niezawodności kondensatorów styroleksowych i ceramicznych. Przegl. Elektron., 1963, 4, № 10—11, 624—628 (РЖЭ, 1964, 6Б112).
17. F. P r o t o s p a t a r o. Prove di vita su condensatori in Moplefan. Mater. Plast. ed Elastomeri, 1963, 29, № 9, 1153—1159 (РЖЭ, 1964, 4Б113).
18. The fabrication of PTFE. AEI Engng, 1964, 4, № 5, 251—257 (РЖЭ, 1965, 3Б70).
19. J. L u d a n y i. Polistirol kondenzatorok kapacitásának stabilitása. Híradástechn., 1964, 15, № 4, 108—113, 128 (РЖЭ, 1964, 12Б104).
20. E. P r z y b y ł. Wyniki badań stabilności i niezawodności kondensatorów styroleksowych, mikowych i papierowych. Przegl. Elektron., 1964, 5, № 10, 504—517.
21. P. K. M c E r l o y. A 100 mkf decade capacitor. Gen. Radio Exp., 1965, 39, № 7, 10—12.
22. R. N. W o r k, R. D. M c G a m m o n, R. G. S a b a. Effective dipole moment of polypropylene. J. Chem. Phys., 1964, 41, № 9, 2950—2951 (РЖЭ, 1965, 7Б72).
23. E. G o t z. Präzisions-Kondensatoren; Roedersten, 1966, № 12, 35—38 (РЖЭ, 1967, 4Б93).
24. W. C. L a m p h i e r. Precision in polystyrene capacitors. Electron. Capabil., 1966, 4, № 1, 54—55 (РЖЭ, 1966, 12Б179).
25. K. A. B u c k i n g h a m, W. R e d d i s h. Low loss polypropylene for electrical purposes. Proc. IEE, 1967, 114, № 11, 1810—1814 (РЖЭ, 1968, 6Б24).
26. H. T. D e w a i d e, C. P o p k e m a. Reliability and stability of miniature polystyrene capacitors. Mullard Techn. Commun., 1967, 9, № 88, 206—212 (РЖЭ, 1968, 5Б136).
27. C. B e h n. MKV-Kondensator, ein neuen selbstheilender Motor und Leistungs-Kondensator. Siemens-Zeitschrift, 1968, 42, № 4, 233—235.
28. G. H a h n, N. W i l k e. Forced tests for the determination of service-reliability of capacitors. Prep. of the Second Symp. on Reliab. in Electron, Budapest, 1968, 311—312.
29. J. L a u b e r. Berechnung des Temperaturbeiwerts der Kapazität eines Wickelkondensators aus den Materialkonstanten der Aufbau beteiligten Folien. Frequenz, 1968, 22, № 10, 294—300.
30. M. S v l j a n s k i - M i k i ć. Difuzia srebra u biskune i polistirolu. "Technika", 1968, 23, № 1, "Elektrotehnika", 17, № 1, 81—83.
31. J. J. M e l l o n. Three insulating barriers protect new Western Electric capacitors. Insulation (USA), 1968, 14, № 6, 28—32.
32. Z. K r a s u c k i. Effect of dielectric thickness on the onset of discharges in liquid-solid dielectrics. Electr. Reas. Associat., Rept., 1967, № 5197, 14 p., (РЖЭ, 1969, 2Б121).
33. J. H. H ü b n e r. Das Temperaturverhalten von Styroflex-Kondensatoren. "Frequenz", 1968, 22, № 12, 343—348.
34. Standard Capacitors and their accuracy in practice. Notes Appl. Sci. Nat. Phys. Lab. 1969, № 13, iv.
35. W. Z w i e s l e r. Styroflex-Kondensatoren für geätzte Schaltungen, Siemens-Bauteile-Inform., 1969, 7, № 3, 70—71.
36. V. H e r d i e c k e r h o f f. Styroflex-Kondensatoren. Aufgleichspektrum, Siemens-Bauteile-Inform., 1969, 7, № 2, 57.

К главе третьей

1. П. Ф. Веселовский. Исследование диэлектрических свойств некоторых эфиров целлюлозы в широком интервале температур. Высокомолек. соедин., 1962, 4, № 11, 1617—1624 (РЖЭ, 1963, 4Б61).
2. В. В. Коршак и др. О возможности использования различных полиарилатов в качестве изоляционных пленочных материалов. «Пластич. массы», 1962, № 12, 37 (см. также «Пластич. массы», 1965, № 9, 16—19 и № 10, 1—3).

3. В. А. Марихин и др. Исследование структуры ориентированного полиэтилентерефталата. «Физика твердого тела», 1962, 4, № 9, 2534—2538.
4. Б. И. Сажин. Исследование электропроводности полимеров. V. Поликарбонат, ПЭТФ, смешанный полиэфир, полиоксиметилен. «Высокомолек. соедин.», 1962, 4, № 4, 583—590.
5. Б. И. Ворожцов и др. Диэлектрические свойства изоляционных материалов при гамма-облучении. V. Полиэтилентерефталат. Изв. вузов, Физика, 1963, № 2, 75—77.
6. Н. В. Александров, С. Г. Трубаев. Электрические и механические свойства полиэтилентерефталатных пленок. Вестн. эл. промышл., 1963, № 8, 41—46.
7. В. В. Маслов. Исследование поликарбонатной пленки в процессе термо-, влаготарения. «Электротехника», 1967, № 4, 44—46.
8. Окамото Сигэхиро, Хара Тору. Диэлектрические свойства цианэтилированной целлюлозы. Васэда Дайгаку Рикогоку Камкисе Хокуку, 1963, № 22, 43—46 (РЖЭ, 1964, 9Б82).
9. L. E. Amborski. H-film, a new high temperature dielectric. Ind. & Eng. Chemistry Prod., Res. and Developm., 1963, 2, № 3, 189—190 (РЖЭ, 1964, 2Б46).
10. D. F. Schmidt. Performance and reliability of rapped and potted Mylar capacitors. Proc. Electron. Conf., 1963, NY, s. a., 142—149 (РЖЭ, 1965, 3Б122).
11. L. Adelson, H. L. Rice. Polycarbonate-foil capacitors. Proc. Electron. Compon. Conf., Wash., 1963, NY, s. a., 44—50.
12. W. E. Tatum, L. E. Amborski. H-film, Du Pont's new polyimide film. El. Insul. Conf., Mat. and Appl., 5th Conf., 1963, s. a., 1—4 (РЖЭ, 1965, 11Б53).
13. B. Clementz. Les condensateurs au polyester. Electron. Profess., 1964, 33, № 342, 55—57.
14. Polycarbonate capacitors. "Australas. Manufacturer", 1964, 49, № 2508, 37—38 (РЖЭ, 1965, 2Б100).
15. H. Strosche. Kondensatoren mit Polyester-Dielektrikum. Radio-Mentor, 1963, № 11, 930—931 (РЖЭ, 1964, 5Б97).
16. Б. Červenka. Polyäthylenterephthalatfolie — ein moderner elektrotechnischen Isolierstoff. "Elektrie", 1965, 19, № 5, 205—207.
17. R. G. Devaney. The electrical properties of K-1 Polycarbonate. Proc. 6th El. Ins. Conf., NY. IEEE, 1965, 116—118.
18. W. Sickmüller, J. A. Sund. Polycarbonate capacitors. Design Electron., 1966, 3, № 5, 26—29 (РЖЭ, 1966, 6Б142).
19. J. Hacker. Polycarbonate Folien Kondensatoren. Roederstein, 1966, № 12, 21—33 (РЖЭ, 1967, 4Б92).
20. Metallized polyester capacitors. Power and Plant South Africa, 1966, № 4, 51 (РЖЭ, 1966, 10Б87).
21. Fogli di policarbonato per l'industria elettrotecnica; 1967, 54, № 6, 464—468 (РЖЭ, 1968, 1Б50).
22. H. Hacker. Polycarbonat Folien Kondensatoren. Radio-Mentor, 1967, 33, 365—367 (РЖЭ, 1967, 12Б113).
23. H. Hofmeier. Polycarbonate film in electrical engineering; Indian and East Engng, 1967, 109, 17—20 (РЖЭ, 1968, 6Б26).
24. Polycarbonate film-foil capacitors. West Electron. News, 1967, 15, № 2, 42 (РЖЭ, 1967, 8Б94).
25. Terphane- le film polyester "Terphane". Plast. et Industr., 1967, 8, № 79, 42—46 (РЖЭ, 1968, 2Б54).
26. B. R. Hayworth. The behaviour of polyesterfilm energy storage capacitors. IEEE Trans. on El. Insulat., 1968, vol. E1—3, № 2, 47—49.
27. V. Kolonits. Ageing properties of polyester capacitors with evaporated electrodes. Prep. of the Second Symp. on Reliab. in Electronics, vol. C. Budapest, 1968, 312—316.
28. T. Robertson. Properties and production of polyester film capacitors. Compon. Technol., 1968, 3, № 1, 14—17.

29. R. Behn. Selbstheilende Schichtkondensatoren aus metallisierten Polycarbonat. Siemens Bauteile Informationen, 1968, 6, № 4, 120—122.
30. L. V. Baldwin. Transition from laboratory to commercial dielectric (a case history; mylar). "Plastics Electr. Insulat.", New York-London-Sydney-Toronto, 1968, 113—131.
31. C. B. Charlton. Some uses of plastic film capacitors. Electron. Equipm. News, 1969, 11 № 9, 24—27.
32. J. P. Bright. Capacitor specification explained, Insulation (VSA), 1969, 15, № 4, 44—46.
33. G. Hoyer. Metallisierte Kunststoffkondensatoren für hohe Gleichspannung. Siemens — Bauteile — Inform., 1969, 7, № 5, 136—139.

К главе четвертой

1. Г. С. Кучинский. Малоиндуктивные импульсные конденсаторы с малыми потерями в разрядном режиме. «Электричество», 1964, № 7, 39—42.
2. И. П. Лялина. Пути уменьшения объема и веса высоковольтного импульсного конденсатора. Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 161—172.
3. Е. С. Майзель. Бумажно-лаковые конденсаторы. Изв. вузов, Энергетика, 1968, № 11, 18—23.
4. В. Т. Ренне. Силовые конденсаторы с комбинированным диэлектриком. «Электричество», 1968, № 5, 79—82.
5. Д. Занобетти. По поводу статьи В. Т. Ренне. «Электричество», 1968, № 11, 90.
6. Ямагами Синдзу. Конденсаторы низкого напряжения с высокой температурной стабильностью. Дэнси Кагаку, 1962, 12, № 2, 84—86 (РЖЭ, 1962, 15, Б29).
7. Симокава Сенти. Многослойные конденсаторы с улучшенным температурным коэффициентом емкости. Дэнси Кагаку, 1962, 12, № 3, 81—83 (РЖЭ, 1963, 5Б128).
8. Г. С. Кучинский и др. Малоиндуктивные импульсные высоковольтные конденсаторы. «Электротехника», 1968, № 8, 43—45.
9. Pole type power capacitors. Transmission & Distribution, 1965, 17, № 12, 52.
10. E. Giannini Mochi, D. Zanobetti. Isotactic polypropylene film for new power capacitors Rep. № 1967/67/2, CIGRE, SK № 18, 16 Meet., 8.07.1967.
11. New Slimwar 300 kVAR power capacitors. Electr. India, 1967, 7, № 3, 34 (РЖЭ, 1967, 12Б106).
12. Power capacitors in production. Electric Review, 1967, 187, № 14, 502—503 (РЖЭ, 1968, 4Б99).
13. Ph. George, R. Hopkins. Dielectric system cuts capacitors size, losses. "El. World", 1968, № 19, 109 (РЖЭ, 1969, 1Б84).
14. E. Giannini Mochi, D. Zanobetti. Characteristics of power capacitors with composite impregnated paper and polypropylene dielectric. Report to 17th Meeting SC № 18 CIGRE, 26.08.1968.
15. G. Mercier, R. D. Mc Clain. Polypropylene film-askarel insulation system improves power capacitors. Insulation (USA), 1968, 14, № 5, 37—38 (РЖЭ, 1969, 1Б83).
16. Power capacitors use new film dielectric. El. Light and Power, 1968, 46, № 4, 113 (РЖЭ, 1968, 12Б188).
17. G. Georg. Kunststoff-Filme in Leistungskondensatoren. Bull. Schweiz. elektrotechn. Vereins, 1969, 60, № 14, 630—634.
18. V. T. Renne. Capacitors with bi-film dielectric, "Electronic Components", 1969, № 7, 843—846.
19. W. T. Renne. Kondensatory z trojwarstwowym dielektrykiem: papier-olej izolacyjny-folia syntetyczna. Przegląd Elektrotechniczny, 1969, XLV, № 1, 8—12.
20. Le Maxivar. Condensateurs de puissance à moyenne tension à film plastique synthétique. Electricien, 1969, 97, № 2110, 308—310.

21. W. H. Deneke. Hochspannungs—Leistungs Kondensatoren mit geringen dielektrischen Verliste. ETZ-B, 1969, 21, № 25, 583—585.

22. G. Merder, R. D. Mc Clain. Leistungs Kondensatoren mit polypropylenfilm. Technische Rundschau, 1969, 61, № 30, 13.

23. Capacitors turn to synthetics. Electr. Times, 1970, 157, N 13. Suppl. "Focus Electr. Insulat.", 19, 21.

24. D. Z a n o b e t t i and All. Power capacitors with mixed paper and polypropylene dielectric, CIGRE, p. 15—04, 24.08.1970. Paris.

25. J. W. E u s t a n c e, W. O. S o l b e r g. Polypropylene film improves power capacitors. Insul./Circuits, 1970, 16, № 5, 43—46.

К главе пятой

1. М. М. Котон и др. Лакопленочный многослойный конденсатор с однородным диэлектриком из полиимида. «Электричество», 1966, № 11, 84—85.

2. D. C. G i r l i n g, E. E. S m i t h. The coated foil capacitor. Proc. IEE, 1962, B109, suppl. № 22, 500—503 (РЖЭ, 1962, 22Б70).

3. H. S h i l l. Recent developments of thin laquer foil capacitors. Nachrichten technik Zeitschrift, 1962, 15, № 11, 549—553.

4. A. B r a d l e y, J. P. H a m m e r s. Electrical properties of thin organic films. J. El. Chem. Soc., 1963, 110, № 1, 15—22 (РЖЭ, 1963, 7Б67).

5. Dünnschichtentechnik bei kondensatoren. Elektro-Techn., 1963, 45, № 12, 225 (РЖЭ, 1963, 12Б138).

6. F. B. R a w l s. Industrial preparedness study Laquer film capacitors. West. El., Co. Quart. Pr. Rep., № 19, 25.08—25.11.1963 (РЖЭ, 1966, 7Б60).

7. H. C. W e h e, W. M c M a h o n. Developments in metallized polycarbonate laquer film capacitors. El. Insul. Conf., Mat. and Appl., 5th Conf., 1963, 7—9 (РЖЭ, 1965, 11Б117).

8. E. M. D a S i l v a, E. C. M i l l e r. Formation of dielectric thin film by a hot glow discharge technique. El. Chem. Technol., 1964, 2, № 5—6, 147—150 (РЖЭ, 1965, 3Б68).

9. P. K o l o n i t s, L. S t a n k o v i t s. A lakkfilm kondenzatorok tulajdonsagat botolyasolo egyes tevezok. Hiradastechn., 1964, 15, № 1, 13—18, 30—31.

10. W. M c M a h o n, H. C. W e h e. Developments in metallized polycarbonate laquer film capacitors. "Insulation" (USA), 1964, 10, № 11, 29—32.

11. M. S t u a r t. Dielectric properties of cross linked polystyrene film formed in the glow discharge. Nature, 1963, 199, № 4888, 59—60 (РЖЭ, 1964, 11Б114).

12. D. J. V a l l e y, J. S. W a g e n e r. ML-1 capacitors, a new miniaturized type of plastic film capacitors. IEEE Trans. Compon. Parts, 1964, 11, № 2, 205—211 (РЖЭ, 1965, 1Б127).

13. New polymers and associated vapor deposition process high integrity thin insulating films; "Insulation" (USA), 1965, 11, № 4, 34, 36, 39 (РЖЭ, 1966, 1Б71).

14. M. S t u a r t. Dielectric losses in polymer films formed by a discharge. Proc. IRE, 1965, 112, № 8, 1614 (РЖЭ, 1966, 2Б51).

15. P. J. H a r r o p. Selection of thin film capacitor dielectrics Thin Solia Films, 1968, 2, № 4, 273—292.

16. M. S k i n n e r. Stacked polymer capacitors. Microelectronics, 1968, 1, № 6, 18—29.

17. P. J. O z a w a. Organic thin-film capacitor; IEE Trans. Parts, Mater. and Packag., 1969, 5, № 2, 112—116.

18. J. J. L i c a r i. Techniques and materials for thin film deposition of polymers for electronics. Insul./Circuits, 1970, 16, № 5, 51—54.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	3
Глава первая. Общие сведения о пленочных конденсаторах	5
§ 1. Конденсаторная бумага и синтетические пленки	—
§ 2. Особенности технологии пленочных конденсаторов	12
§ 3. Особенности конструкции пленочных конденсаторов	30
§ 4. Классификация пленочных конденсаторов	40
Глава вторая. Конденсаторы из неполярных пленок	45
А. Конденсаторы из полистирольной пленки и из сополимеров стирола	—
§ 5. Полистирольная пленка — стирофлекс ✓	—
§ 6. Некоторые сведения о технологии и конструкции полистирольных конденсаторов	50
§ 7. Электрические свойства полистирольных конденсаторов	59
§ 8. Полистирольные конденсаторы с повышенным напряжением и с повышенной реактивной мощностью	79
§ 9. Применение сополимеров полистирола в конденсаторостроении	85
Б. Конденсаторы из пленок полиолефинов	88
§ 10. Полиэтиленовая пленка и ее применение в конденсаторостроении ✓	—
§ 11. Полипропиленовая изотактическая пленка и полипропиленовые конденсаторы	97
В. Конденсаторы из пленок фторорганических соединений	104
§ 12. Пленки из политетрафторэтилена и из фторированного сополимера этилена и пропилена ✓	—
§ 13. Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена (фторопластовые) ✓	111
Г. Новые неполярные (синтетические) пленочные диэлектрики с повышенной нагревостойкостью	117
§ 14. Полипараксилилен и полифениленоксид	—
Глава третья. Конденсаторы из полярных пленок	121
§ 15. Пленки из эфиров целлюлозы и их применение в конденсаторостроении	—
§ 16. Полиэфирные пленки для конденсаторов	128
§ 17. Полиэтилентерефталатные конденсаторы	133
§ 18. Поликарбонатная пленка и поликарбонатные конденсаторы ✓	149
§ 19. Новые полярные пленочные диэлектрики с повышенной нагревостойкостью	159
Глава четвертая. Конденсаторы с комбинированным диэлектриком	164
§ 20. Общие принципы применения комбинированных диэлектриков	—
А. Последовательное включение компонентов	165
Б. Параллельное включение компонентов	167
§ 21. Учет влияния зазоров на электрические свойства конденсаторов с комбинированным диэлектриком при последовательном соединении его компонентов	170

§ 22. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из полярной синтетической пленки и конденсаторной бумаги	176
§ 23. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из неполярной пленки и конденсаторной бумаги	185
§ 24. Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из двух синтетических пленок	196
Глава пятая. Тонкопленочные конденсаторы	201
§ 25. Общие соображения	—
§ 26. Лакопленочные конденсаторы с удаленной подложкой	203
§ 27. Лакопленочные конденсаторы с сохраненной подложкой	212
§ 28. Тонкослойные конденсаторы с сохраненной подложкой, изготовленные с использованием новых методов получения тонких слоев диэлектрика	218
Заключение	227
Литература	230